UNTERSUCHUNGEN ZUR AUSHÄRTUNG WEISSLICHTHÄRTENDER COMPOSITE-FÜLLUNGSMATERIALIEN

Inauguraldissertation
zur Erlangung der Würde des Doktors der Zahnmedizin
der Johannes Gutenberg - Universität in Mainz
dem Fachbereich Medizin vorgelegt

von Stephan Ulmschneider
aus Stuttgart - Bad Cannstatt

Mainz 1981

1982

Aus der Poliklinik für Zahnerhaltungskunde, Direktor Prof.Dr.med., Dr.med.dent. W. Ketterl, der Klinik und Poliklinik für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde der Johannes Gutenberg - Universität Mainz

UNTERSUCHUNGEN ZUR AUSHÄRTUNG WEISSLICHTHÄRTENDER COMPOSITE-FÜLLUNGSMATERIALIEN

Inauguraldissertation
zur Erlangung der Würde des Doktors der Zahnmedizin
der Johannes Gutenberg - Universität in Mainz
dem Fachbereich Medizin vorgelegt

von Stephan Ulmschneider
aus Stuttgart - Bad Cannstatt

Mainz 1981

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Dekan:	Professor Dr.med. K.-H. Bäßler
1. Gutachter	Professor Dr.med.dent. F. Lampert
2. Gutachter	Professor Dr.med., Dr.med.dent. W. Ketterl

Tag der mündlichen Prüfung: 19.1.1982

Meinen Eltern gewidmet

Inhaltsverzeichnis

		Seite
1.	Die weißlichthärtenden Composite-Füllungsmaterialien: Aufbau und Aushärtungsprinzip	1
2.	Vor- und Nachteile weißlichthärtender Composite-Füllungsmaterialien gegenüber anderen Compositematerialien	6
3.	Kurze Darstellung der schädlichen Wirkungen unausgehärteten Füllungsmaterials	8
4.	Eigene Untersuchungen	14
4.1.	Kurze Charakterisierung der untersuchten Materialien und Geräte	14
4.2.	Herstellung der Materialproben	14
4.2.1.	Vorbereitung des Materials	15
4.2.2.	Belichtung des Materials	15
4.2.3.	Ablösung der nicht erhärteten Anteile und Trocknung der Materialproben	17
4.3.	Auswertung der Materialproben	19
4.4.	Ergebnisse der Versuchsserien in Tabellen und graphischen Darstellungen	23
4.5.	Theoretische Betrachtungen zu den Versuchsergebnissen und Diskussion derselben	88
5.	Literaturverzeichnis	122

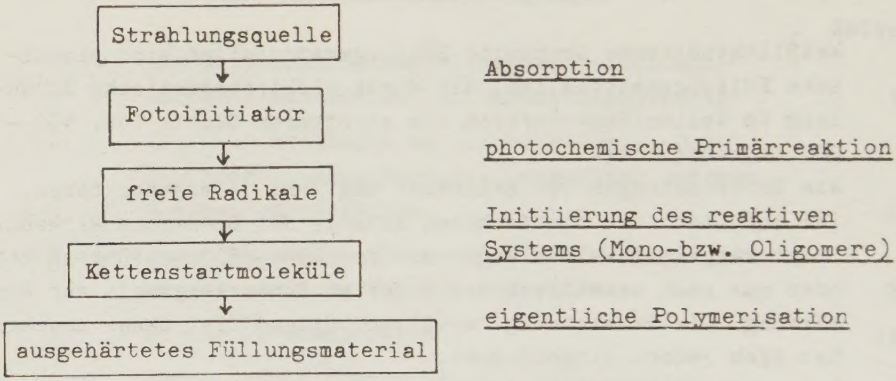
1. Die weißlichthärtenden Composite-Füllungsmaterialien: Aufbau und Aushärtungsprinzip

Weißlichthärtende Composite-Füllungsmaterialien sind plastische Füllungsmaterialien, die durch elektromagnetische Strahlung im Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts (ca. 400 - 800 nm) aushärten.
Wie Untersuchungen von Reinhardt und Vahl [1] ergeben haben, ist nur Licht des blaufarbenen Anteils des Spektrums wirksam. Licht mit einer Wellenlänge von über 490 - 500 nm führt nicht oder nur nach wesentlich verlängerter Einwirkungszeit zur Aushärtung. Die Bezeichnung "weißlichthärtend" ist daher unscharf, hat sich jedoch eingebürgert.
Ein weißlichthärtendes Composite-Füllungsmaterial unterscheidet sich von einem konventionellen (zwei Komponenten-) Compositematerial prinzipiell nur durch ein von diesem unterschiedliches Katalysatorsystem. Einzelheiten über den chemischen Aufbau dieser Katalysatoren sind nur schwer in Erfahrung zu bringen und für den Zahnarzt ohne Belang, sofern diese Bestandteile sei es durch besondere Toxizität oder schädliche Wirkungen auf die Füllung (z.B. Verfärbung) keine Nachteile zeigen.
Der Ablauf einer Strahlungshärtung mit sichtbarem Licht oder mit UV-Strahlung sei hier jedoch in seinen Grundzügen erwähnt:

Die von der Lichtquelle erzeugte Strahlung wird von dem im Katalysatorsystem enthaltenen Fotoinitiator absorbiert. Dieser setzt die Lichtenergie in freie Radikale, das heißt chemisch äußerst reaktionsfähige Stoffe um. Durch die Reaktion dieser Radikale mit den im Compositematerial enthaltenen Monomeren, bzw. Oligomeren werden zunächst Kettenstartmoleküle erzeugt, die dann die Polymerisation und somit Aushärtung des Materials in Gang bringen.

1) vgl. Reinhardt, K.J., Vahl,J., Ein Vergleich lichthärtender und UV-polymerisierbarer Versiegler und Komposite, in: DZZ 34 (1979), S. 245-250

Schematisch stellt sich der Ablauf so dar [2]:



Die Aushärtung findet jedoch nur dort statt, wo genügend Strahlung der wirksamen Wellenlängen einwirkt, die den Fotoinitiator aktiviert. Es ist folglich unrichtig, daß bei der Aushärtung einer Füllung,die aus einem solchen Material besteht, es genügt, wenn die Reaktion an einer beliebigen Stelle stattfindet, und dann die ganze Füllung erhärtet, etwa so wie ein Streichholz abbrennt, wenn es an einem Ende angezündet wird. Dies stellt ein für strahlungshärtende Füllungsmaterialien spezifisches Problem dar, welches bei anderen Composite-Materialien bei korrekter Durchmischung der Einzelkomponenten nicht auftritt. Der Untersuchung von Teilaspekten der daraus sich ergebenden Konsequenzen dient der experimentelle Teil dieser Arbeit.

2) abgeändert nach: Herz, C.P., Eichler,J., Neisius, K.H., UV-Strahlungshärtung, in: Kontakte 3 (1979), S. 37 - 44

Die räumlich begrenzte Aushärtung der weißlicht- oder UV-härtenden Composite ist unter anderem dadurch begründet, daß das Material einen Stabilisator enthalten muß, der eine spontane Aushärtung, zum Beispiel durch Temperatureinwirkung verhindert und dadurch das Füllungsmaterial erst lagerfähig macht. Trotzdem ist eine Aushärtung bei längerer Einwirkung höherer Temperaturen möglich. Aus diesem Grund empfehlen die Hersteller eine kühle Lagerung ihrer Produkte.
Ein weißlichthärtendes Composite-Material besteht insgesamt aus folgenden Einzelkomponenten:

1. Organische Bestandteile

a. Monomere, bzw. Oligomere, deren Polymerisate beim ausgehärteten Material die organische Matrix bilden.
b. Lichtempfindliches Katalysatorsystem (Fotoinitiator)
c. Stabilisatoren
d. Spuren anderer Stoffe (z.B. Farbstoffe)

2. Anorganische Bestandteile (Füllstoffe)

Es sei hier angemerkt, daß die Füllstoffe (im wesentlichen SiO_2) im erhärteten Material auch chemisch an die organischen Bestandteile gebunden vorliegen können (Silanisierung).

Auf die monomeren Bestandteile soll etwas ausführlicher eingegangen werden, da das Folgende für den experimentellen Teil dieser Arbeit von Bedeutung ist (siehe 4.2 Herstellung des Untersuchungsmaterials).

Asmussen hat 1975 die organischen Bestandteile, insbesondere die Monomere der damals auf dem Markt befindlichen Composite-Materialien untersucht[3]. Er stellte fest, daß sich die Mehrzahl der untersuchten Produkte zwei Gruppen bezüglich der in Ihnen vorhandenen Monomere zuordnen läßt:

3) Asmussen, Erik, NMR-Analysis of monomers in restorative resins, in: Acta Odont. Scand. 33, 1975, S. 129 - 134

1. Materialien mit einem hohen Anteil von BIS-GMA
2. Materialien auf der Basis von Methylmethacrylat

$$H_2C = \underset{\underset{CH_3}{|}}{C} - CO - O - CH_3$$

Bei der Verwendung von BIS-GMA ist stets der Zusatz eines zweiten Monomers notwendig, um die hohe Viskosität von BIS-GMA herabzusetzen und so beim Zusatz eines möglichst hohen Anteils an anorganischen Füllstoffen (z.B. pyrogenes SiO_2) noch ein verarbeitungsfähiges Material zu erhalten. Wie Asmussen durch seine spektroskopischen Untersuchungen ermittelte, werden hierzu oft mehrfunktionelle Methacrylsäureester, z.B. TEDMA (Triäthylenglycol-dimethacrylat) benutzt.
Beiden Stoffen, dem zuletzt genannten und BIS-GMA ist gemein, daß sie zwei funktionelle Doppelbindungen enthalten. Es handelt sich dabei also um mehrfunktionelle Monomere (Funktionalität > 2) Mehrfunktionelle Monomere bilden bei der Polymerisation dreidimensional hochvernetzte Polymere.[4] [5] Als vernetzt gilt ein Polymeres dann, wenn es in allen organischen Lösungsmitteln unlöslich ist. [6][7][8] Nach Elias [9] sind räumlich vernetzte Polymere definitionsgemäß unendlich groß. Eine Beschreibung über ihr Molekulargewicht ist daher sinnlos. Vernetzte Polymere werden stattdessen über die Netzkettenlänge, die Netzwerkdichte und die Art der Verknüpfung beschrieben. Aus diesem Grund ist die Angabe des Polymerisationsgrades vernetzter Polymere unmöglich, da dieser unter anderem über das Molekulargewicht definiert ist.[10]

4) Vollmert, Bruno, Grundriss der Makromolekularen Chemie, Berlin 1962, S. 23
5) Schwickerath, H., Werkstoffe in der Zahnheilkunde, 1977, S.271
6) Vollmert, a.a.O., S. 23
7) Elias, H.G. Makromoleküle, Struktur-Eigenschaften-Synthesen-Stoffe, Basel, Heidelberg, 1971, S. 39
8) Schildknecht, C.E., Vinyl and related Polymers, New York 1959, S. 68
9) Elias, a.a.O., S. 39
10) ebda

Obwohl vernetzte makromolekulare Strukturen in organischen Lösungsmitteln unlöslich sind, so können sie doch in diesen aufquellen. Hochvernetzte Stoffe quellen weniger stark als schwach vernetzte. Dabei kann der Grad der Quellung als ein relatives Maß für den Grad der Vernetzung dienen.[11)]
Vernetzte Polymerisate werden in der neueren chemischen Literatur "Duromere" genannt (die Bezeichnung "Duroplaste" ist widersinnig). Gegenüber unvernetzten Verbindungen zeichnen sich die Duromere durch höhere Druckfestigkeit und Härte [12)] und durch ein verändertes thermoelastisches Verhalten aus.[13)]
Es ist einsichtig, daß besonders die zuerst genannten Eigenschaften für die Verwendung dieser Stoffe in Füllungsmaterialien als günstig zu bezeichnen sind. Sie sind neben der geringeren Polymerisationsschrumpfung und der ebenfalls geringeren Diffusion durch Unterfüllung und Dentin auf Grund der Molekülgröße ein Vorteil der Composite-Materialien auf BIS-GMA-Basis. Sie gelten aber prinzipiell auch für andere Composite, die mehrfunktionelle Monomere im unausgehärteten Material besitzen.
Präparate, die als Monomer alleine Methamethylacrylat enthalten, zeigen diese Vorteile nicht. Ihnen wird jedoch, wie die Untersuchung Asmussens zeigt[3)] meist noch ein anderes, in der Regel mehrfunktionelles Monomer zugesetzt, so daß bei der Polymerisation vernetzte Strukturen mit den ihnen eigenen Vorteilen entstehen.
Die im praktischen Teil der Arbeit untersuchten Composite-Materialien bilden bei der Polymerisation vernetzte Makromoleküle, wie sich aus den Hinweisen der Hersteller zu den von ihnen benutzten Monomeren schließen läßt.[14)]

11) Vollmert, a.a.O., S. 26
12) Schwickerath, a.a.O., S. 271
13) Ruske, W., Einführung in die organische Chemie, Weinheim 1970, S. 641
14) Symposion on Fotofil[R] Dental Restorative, 1978
Prospekte für die Produkte Durafil[R] und Visio-Dispers[R]

Auf die anorganischen Füllstoffe und deren Besonderheiten (pyrogenes SiO_2, Erzielung eines hohen anorganischen Anteils Silanisierung) soll im Rahmen dieser Arbeit nicht eingegangen werden.

2. Vor- und Nachteile weißlichthärtender Composite-Füllungsmaterialien gegenüber anderen Composite-Materialien

Die weißlichthärtenden Composite-Materialien können als eine Weiterentwicklung der konventionellen Composite-Füllungsmaterialien angesehen werden. Sie verbinden laut Angaben der Hersteller die vorteilhafte, praktisch unbegrenzte Verarbeitungszeit der UV-härtenden Composite-Materialien mit einer größeren aushärtbaren Schichtdicke und besserer biologischer Verträglichkeit. Die theoretisch zu erwartenden Vor- und Nachteile sollen hier kurz dargestellt werden.

2.1. Vorteile

Die Verarbeitungszeit ist gegenüber den UV-aktivierbaren Composite-Materialien reduziert, da auch die übliche Raumbeleuchtung nach einiger Zeit zur Aushärtung führt.[15] Sie ist trotzdem wesentlich länger als bei Compositen, die durch Beimischen eines Katalysators spontan nach einiger Zeit aushärten.

Dadurch, daß kein Anmischen notwendig ist, sind Fehler durch ungenügende Durchmischung, falsches Mischungsverhältnis der einzelnen Komponenten, Lufteinschlüsse usw. nicht möglich. Dieser Vorteil kann jedoch verloren gehen, wenn zur besseren Farbgestaltung einer Füllung trotzdem gemischt werden muß.

15) Reinhardt, Vahl, a.a.O. S. 254 - 250

Reinhardt und Vahl führen die gegenüber UV-härtenden Materialien größere Aushärtetiefe auf die Abhängigkeit des Streulichtanteils von der Frequenz und damit der Wellenlänge der zur Aushärtung benutzten elektromagnetischen Strahlung zurück (Proportionalität der Streulichtintensität von der 4. Potenz der Frequenz).[16] Wahrscheinlich spielt jedoch außerdem eine größere Absorption der UV-Strahlung im Vergleich zum sichtbaren Licht durch das Composite-Material eine Rolle. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, daß nur ein sehr geringer Strahlungsanteil des absorbierten Lichts chemisch für die Polymerisation wirksam wird. Der weitaus größte Anteil erwärmt nur das Material.
Zur größeren biologischen Verträglichkeit der Aushärtung durch sichtbares Licht als bei Verwendung von UV-Strahlen ist zu bemerken, daß eine besondere Schädlichkeit der UV-A-Strahlung mit der die UV-härtenden Composite polymerisiert werden, in klinischen Untersuchungen bisher nicht festgestellt wurde. Untersuchungen an Zellkulturen zeigten jedoch biologische Effekte, wie zum Beispiel chemische Veränderungen am Genmaterial (Thymin-Dimere), Inaktivierung von Transfer-DNA und Veränderungen an Zellenzymen. Durch solche und ähnliche Einwirkungen können unter anderem Bakterienkulturen von E. coli binnen 10 Minuten bis auf 5% der ursprünglichen Bakterienanzahl abgetötet werden.[17]
Andererseits kann auch elektromagnetische Strahlung im sichtbaren Bereich schädlich oder zumindest unangenehm sein (Blendung).

2.2. Nachteile

Die Nachteile der weißlichthärtenden Composite ergeben sich aus den weiter vorne unter dem Stichwort "Strahlungshärtung" bereits erwähnten Gegebenheiten. An Stellen des Materials, die vom Licht

16) ebd.
17) Birdsell, D.C., Bannon, P.J., Webb, R.B., Harmful effects of near-ultraviolett radiation used for polymerization of a sealant and a composite resin, in: JADA, Vol.94, Feb.'77 S. 311 - 314

des wirksamen Wellenlängenbereichs nicht mit genügend hoher Intensität und in ausreichender Zeitdauer getroffen werden, findet über einen längeren Zeitraum hinaus keine Aushärtung des Materials statt. Freilich können diese Materialanteile im Laufe der Zeit zum Beispiel durch Abbau des im Material enthaltenen Stabilisators noch erhärten, doch bis dies geschehen ist, können von unausgehärteten Füllungsanteilen unerwünschte iatrogene Wirkungen ausgehen.

3. Kurze Darstellung der schädlichen Wirkungen unausgehärteten Composite-Füllungsmaterials

Die möglichen Schäden können zwei Gruppen zugeordnet werden:

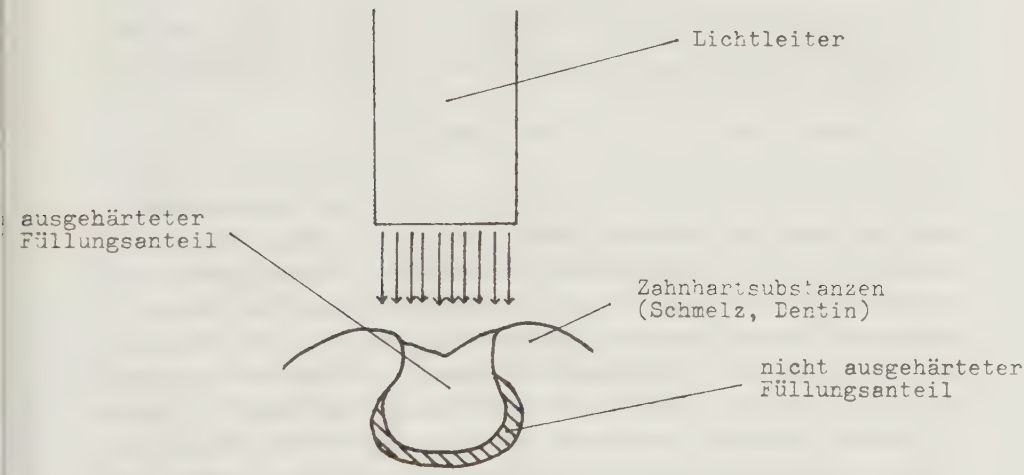
a) Wirkungen auf die physikalischen Eigenschaften der Füllung

b) Biologische Wirkungen insbesondere auf die Zahnpulpa

Es ist einsichtig, daß unausgehärtetes Füllungsmaterial, welches im Falle photopolymerisierender Füllungsmaterialien bevorzugt dort liegt, wo es der Inspektion durch den Zahnarzt nicht mehr zugänglich ist, die mechanische Festigkeit der Füllung reduziert. Überspitzt formuliert können sich Verhältnisse einstellen, die der eines Sees entsprechen, welcher von einer Eisdecke überzogen ist, die bei entsprechender Belastung einbricht. Neben einer mechanischen Destruktion der Füllung, wie eben angedeutet, ist auch eine Reduzierung der Retention der Füllung denkbar, da Verschattungen und damit die Gefahr unausgehärteter Füllungsanteile besonders in Unterschnitten auftreten können. Die Zeichnung auf der nächsten Seite zeigt diese Verhältnisse schematisch.
Die physikalischen Auswirkungen unpolymerisierten Materials werden in der Regel den betreffenden Zahn nicht gefährden, wenn eingetretene Schäden (Zerstörung der Füllung, Lockerung

derselben) vom Zahnarzt erkannt und rechtzeitig behoben werden.

Skizze zur Lage nicht ausgehärteten Füllungsmaterials in der Kavität:



Weitaus gefährlicher ist die biologisch, toxische Wirkung unausgehärteten Füllungsmaterials zu bewerten, können doch bei Einwirkung auf das Dentin und besonders die Pulpa die Vitalität des betreffenden Zahnes und damit dessen biologische Wertigkeit für das stomatognathe System beeinträchtigt werden.

Als schädigende Agentien kommen dabei in Frage:

a) die nichtpolymerisierten Mono- bzw. Oligomere

b) die chemischen Substanzen des Katalysatorsystems

c) Farb- und andere Hilfsstoffe

Die Beurteilung der Gefährlichkeit dieser Substanzen für die Pulpa erweist sich als äußerst schwierig. Es gibt hierbei zwei Möglichkeiten der Untersuchung:

a) Untersuchungen an vitalen Zähnen (z.B. von Ratten) unter Herstellung einer Kavität und Einbringen des Füllungsmaterials in dieselbe.[18)]

b) Untersuchungen an Zell- bzw. Gewebekulturen

Der erste methodische Ansatz erscheint zunächst günstiger, kommt er doch der in-vivo-Situation beim Patienten nahe. Doch ist die Ausführung komplizierter, die zu beachtenden Parameter zahlreicher und damit auch die Wertung der Ergebnisse schwieriger. Bei der Untersuchung an Zell- und Gewebekulturen können leichter genau definierte Versuchsbedingungen eingehalten werden. So finden sich diese in der zahnärztlichen Literatur häufiger. Dennoch sind die so gewonnenen Ergebnisse nicht leicht und eindeutig zu interpretieren. Denn es läßt sich einwenden, daß die Reaktion der untersuchten Zellen, bzw. Gewebe nicht der Reaktion der Zellen der Pulpa entsprechen muß. Auch können Stoffe sich als äußerst toxisch erweisen, die im Realfall gar nicht durch die Unterfüllung und das Dentin diffundieren und damit wirksam werden können. Eine kombinierte Untersuchung nach beiden methodischen Ansätzen erscheint daher wünschenswert.

18) Klötzer, W.T., Rosenthal, R., Riethe,P., Komposit-Füllungsmaterialien im Tierversuch, in DZZ, Nr. 32, 1977, S.367-372

Immerhin gestatten es die Versuche an Zellkulturen die Toxizität der Materialien bezüglich ganz bestimmter Zellarten und Gewebe zu ermitteln. S. Fuijsawa und andere [19] untersuchten den Hämolysegrad von Erythrozyten bei der Einwirkung von MMA und BIS-GMA in einem Konzentrationsbereich in dem beide Monomere löslich sind. Sie stellten fest, daß BIS-GMA bei gleicher Konzentration einen höheren Hämolysegrad ergibt als MMA, in diesem Fall also toxischer ist.
Neupert und Welker [20] untersuchten die zytotoxische Wirkung von zwei Composite-Materialien auf Basis der Bowen-Formel im Vergleich zu zwei Silikatzementen. Sie fanden heraus, daß bei Ausschaltung der pH-Wirkung des Silikatzements, diese und die beiden Composite-Materialien etwa die gleiche Zytotoxizität zeigen.
Lampert und Heidemann [21] untersuchten die Wirkung von drei Composite-Materialien auf der Basis der modifizierten Bowen-Formel im Kontakt mit Primärzellkulturen von Fibroblasten und Ephitelzellen der menschlichen Gingiva. Sie kamen im Einklang mit anderen Autoren zu dem Ergebnis, daß die Zytotoxizität der polymerisierten Composite-Materialien mit längerer Liegedauer abnimmt. Sie stellten jedoch auch fest, daß erstaunlicherweise polymerisiertes und unpolymerisiertes Füllungsmaterial (Nuvafil^{R}) sich in ihrer Zytotoxizität nicht signifikant unterscheiden. Dies muß jedoch nicht bedeuten, daß die schädlichen Effekte in keinem Zusammenhang mit dem Restmonomer des polymerisierten Composite-Materials und dem Monomer des unpolymerisierten Kunststoffes stehen. Es ist eher ein Hinweis darauf, daß bereits kleine Mengen an Monomer bzw. anderen löslichen Bestandteilen der untersuchten Füllungsmaterialien genügen, um

19) Fuijsawa, S., Imal, Y., Masuhara, E., Löslichkeit und Hämolysegrad als Methoden zur in-vitro-Bewertung von zahnärztlichen Füllungsmaterialien, in DZZ, 1978, S. 706-711
20) Neupert, Welker, Vergleichende Untersuchung der zytotoxischen Wirkung von Composite-Füllungsmaterialien und Silikatzement, DZZ, 31, 1976, S. 919-923
21) Lampert, F., Heidemann, D., Composite-Füllungsmaterialien in der Zellkultur, DZZ 35, 1980, S. 483-485

Schäden an Zellen, wie Granulation und Vakuolisierung des Zytoplasmas, Zellformveränderungen, Adhäsionsverlust und schließlich den Zelltod auszulösen, und daß eine weitere Erhöhung der Konzentration der schädigenden Wirkstoffe nicht eine proportional steigende Zytotoxizität bedeutet.
Es muß daher daran gelegen sein, selbst kleinste Mengen von in Frage kommenden Schadstoffen von der Zahnpulpa fernzuhalten.

Die schädigenden Agentien erreichen die Pulpa über eine Diffusion durch Unterfüllung und Dentin. Um diese Diffusion so gering wie möglich zu halten, und damit iatrogene Schäden zu verhindern, gibt es mehrere Möglichkeiten:

a) Verringerung des Konzentrationsgradienten der Schadstoffe zwischen Füllungsmaterial und Pulpa

Daraus ergibt sich direkt die Forderung nach einem vollständig ausgehärteten Füllungsmaterial, da die Konzentration von Monomer und auch Stoffen des Katalysatorsystems bei der Polymerisation stark abnimmt.

b) Vergrößerung der Diffusionsbarriere

Als Diffusionsbarrieren wirken das Dentin, die Unterfüllung, aber auch das Composite-Füllungsmaterial selbst. Die Dicke und Struktur der Dentinschicht kann vom Zahnarzt nicht beeinflußt werden, richtet sie sich doch nach dem individuellen Zustand des betreffenden Zahnes (Größe des kariösen Defektes, Mineralisation des Dentins, usw.).
Beeinflußbar ist die Dicke und Struktur der Unterfüllung. Im Sinne der Einschränkung der Diffusion sollte diese möglichst dicht (geringe Porosität) und dick sein. Dabei wird davon ausgegangen, daß das Unterfüllungsmaterial selbst wesentlich weniger schädigende Stoffe abgibt als das Composite-Füllungsmaterial. Außerdem darf die Unterfüllung durch das definitive Füllungsmaterial nicht korrodiert werden.
Bereits weiter vorne wurde ausgeführt, daß die Quellung eines vernetzten Kunststoffes abhängig ist vom Vernetzungsgrad desselben. Die Voraussetzung für Quellung ist die Diffusion eines

Stoffes in den Kunststoff hinein. Wird diese Diffusion durch die Dichte des molekularen Netzwerkes behindert, was einem hohen Vernetzungsgrad entspricht, so ist auch die Quellung geringer. Da Diffusion auch in der Gegenrichtung stattfindet, gilt dies auch für die Abgabe pulpenschädlicher Stoffe durch das Füllungsmaterial. Alleine die Struktur der organischen Matrix des polymerisierten Füllungsmaterials hat demnach einen Einfluß auf einen möglichen pulpenschädigenden Effekt.

c) Diffusionserschwerung durch Änderung der Struktur der schädlich wirkenden Stoffe

Da große Moleküle schlechter diffundieren als kleine, sind größere Moleküle als Monomer von Vorteil. Bezogen auf die Monomere eines Composite-Füllungsmaterials sollten diese demnach aus größeren Molekülen bestehen. Allerdings hat dies auch eine Erhöhung der Viskosität zur Folge, was im Hinblick auf die Verarbeitungsfähigkeit und einem möglichst hohen anorganischen Füllstoffanteil ungünstig ist. Außerdem können Monomere mit größeren Molekülen bei ansonsten gleicher Monomerkonzentration toxischer sein als Monomere mit kleinerer Molekülgröße. [19)]

Das Problem der toxischen Wirkung von Composite-Füllungsmaterialien auf die Pulpa ist außerordentlich komplex, da eine Vielzahl von Faktoren zu beachten ist. Aus dem oben Dargestellten ergibt sich jedoch, daß das Verbleiben unpolymerisierten Composite-Materials in der Kavität wegen einer möglichen Pulpenschädigung und anderer Nachteile auf alle Fälle zu vermeiden ist. Da unausgehärtete Füllungsanteile ein spezifisches Problem UV- und weißlichthärtender Composite-Füllungsmaterialien darstellen, ist damit der Bezug zur praktischen Bedeutung des folgenden experimentellen Teils dieser Arbeit gegeben.

4. Eigene Untersuchungen

4.1 Kurze Charakterisierung der untersuchten Materialien und Geräte

Gegenstand der Untersuchung sind drei lichthärtende Composite-Materialien:

1. Visio-dispers^R (Espe, Seefeld)
2. Durafil^R (Kulzer, Bad Homburg)
3. Fotofil^R (Johnson & Johnson)

Von allen drei Füllungsmaterialien werden Materialproben hergestellt. Zur Aushärtung werden dabei die von den Herstellern empfohlenen Lichtquellen benutzt.

Das Fotofil^R-Aktivatorlicht emittiert Licht im Wellenlängenbereich von 450-470 nm, das heißt kein UV-Licht.
Das "Translux^R Lichtgerät" von Kulzer emittiert Licht im Bereich von 400-500 nm mit einem Maximum bei 460 nm (ebenfalls ohne UV-Anteil)
Das UVIO-VISIO^R-Gerät der Firma Espe strahlt Licht und UV-A-Strahlung im Wellenlängenbereich von 330-480 nm aus. Damit nimmt Visio-dispers insofern eine Sonderstellung ein, als daß es weder als reines weißlichthärtendes noch als reines UV-A-härtendes Material bezeichnet werden kann.

4.2 Herstellung der Materialproben

Die Füllungsmaterialien werden in einem Probenhalter unter sich ändernden optischen Bedingungen belichtet. Nach 24 Std. wird der erhärtete Materialanteil, im folgenden Materialprobe genannt, vom nicht erhärteten Anteil getrennt und die räumliche Ausdehnung des polymerisierten Materials bestimmt.

4.2.1 Vorbereitung des Materials

Die Materialien werden mit Hilfe eines geeigneten Spatels in die Probenhalter eingebracht. Bei den Probehaltern handelt es sich um Messinglochscheiben mit einem Innendurchmesser von 5,1 mm, einem Außendurchmesser von 20 mm und einer Stärke von 4 mm.

4.2.2 Belichtung des Materials

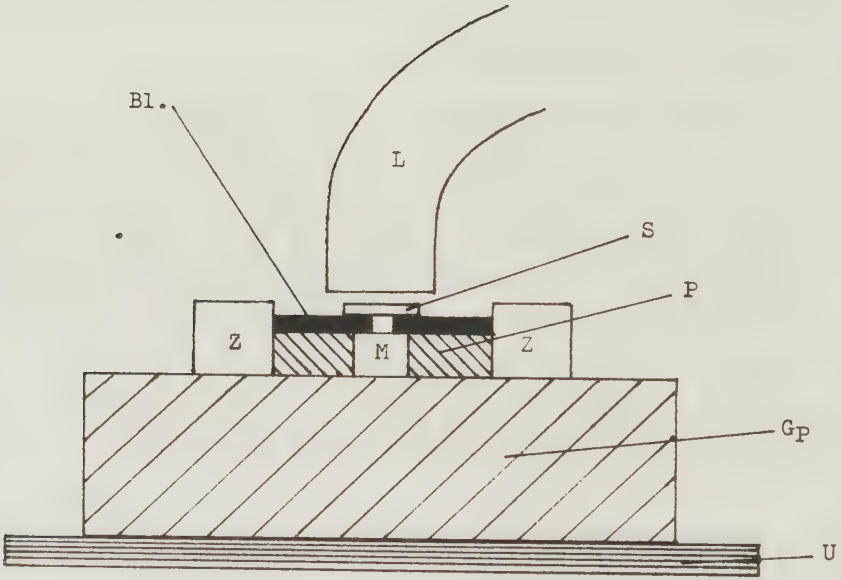
Die Versuchsanordnung entnehme man der schematischen Zeichnung auf der nächsten Seite. Der Abstand zwischen Material und Austrittsöffnung des Lichtleiters beträgt konstant 4 mm, die Dicke der Blenden 1 mm. Es kommen Blenden mit 1 - 4 mm Öffnungsdurchmesser in 1 mm-Schritten und mit 5,1 mm Öffnungsdurchmesser zur Anwendung. Bei einer Anzahl von Versuchsserien liegt zwischen der Austrittsöffnung des Lichtleiters und der Blende zusätzlich eine 1 mm starke Schmelzscheibe. In diesem Fall werden Blenden von 1,2,3 mm Öffnungsdurchmesser benutzt.
Die Belichtungszeiten für die verschiedenen Materialien richten sich nach den Herstellerangaben. Sie betragen für

Visio-dispers^R	20 s	für alle Einfärbungen
Durafil^R	20 s	für <u>nicht-opake</u> Chargen
	40 s	für <u>opake</u> Chargen
Fotofil^R	60 s	

Die Hinweise der Hersteller zur Inbetriebnahme und Benutzung der Lichtgeräte werden genau beachtet. Ca. 10 Min. nach der Belichtung werden die Proben vorsichtig aus der Erhärtungsform gelöst. Es folgt eine 24-stündige Lagerung im Dunkeln bei Zimmertemperatur (ca. 20° C).

Versuchsaufbau

Maßstab 2:1



L ≙ Lichtleiter
S ≙ Schmelzschicht
Bl ≙ Blende
M ≙ Materialprobe
P ≙ Materialprobenhalter
Z ≙ Zentriervorrichtung
G_p ≙ Glasplatte
U ≙ stabile Unterlage (mit schwarzer Oberfläche)

4.2.3 Ablösung der nicht erhärteten Anteile und Trocknung der Materialproben

Da die untersuchten Composite-Materialien unter anderem Monomere mit zwei reaktionsfähigen Doppelbindungen enthalten, bilden sich bei der Polymerisation dreidimensional vernetzte Makromoleküle. Diese besitzen, wie schon vorne erwähnt, im Gegensatz zu Kunststoffen mit nur kettenförmigen Polymeren (z.B. Polyäthylen) fast keine Löslichkeit in organischen Lösungsmitteln.

Die Monomere dieser Composite-Materialien sind jedoch wie alle Monomere sehr gut in organischen Lösungsmitteln löslich. Auf diesem sehr großen Löslichkeitsunterschied zwischen der erhärteten Matrix der Composite-Materialien und den Monomeren des nicht erhärteten Materials beruht der Trennvorgang, bei dem schließlich der nicht aufgelöste, erhärtete Anteil zurückbleibt.

Als Lösungsmittel dient Aceton (Dimethylketon). Es bietet den Vorteil eines guten organischen Lösungsmittels, welches gleichzeitig in jedem Verhältnis mit Wasser mischbar ist. Der Trennvorgang verläuft in mehreren Stufen. Um eine Aufquellung der erhärteten Anteile durch das Lösungsmittel so gering wie möglich zu halten (Dimensionsänderungen!), wird das Verfahren möglichst kurz gehalten:

1. Schritt: Eine Materialprobe und 5ml Aceton werden in ein Reagenzglas gefüllt und 1 min lang vorsichtig geschüttelt. Die entstehende Suspension der freiwerdenden anorganischen Füllstoffe trübt das Aceton - Monomergemisch, welches sofort abgeschüttelt wird.

2. Schritt: Ist eine Wiederholung des ersten Schrittes. Nach der zweimaligen Behandlung mit Aceton hat sich der nicht erhärtete Anteil schon gut aufgelöst. Beim vorsichtigen Abschütteln bleibt das erhärtete Mate-

rialstück in einem Bodensatz aus Aceton-Monomergemisch (geringer Monomeranteil) und anorganischen Füllstoffen zurück.

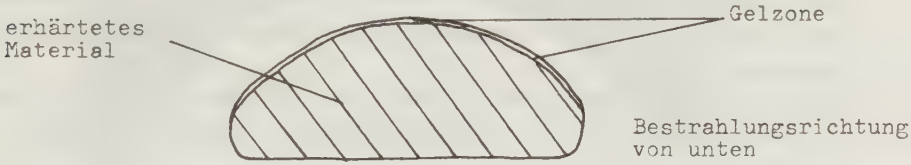
3. Schritt: Um den entstandenen Bodensatz vom erhärteten Material zu trennen, wird jetzt mehrmals vorsichtig mit Wasser gespült, bis alleine das erhärtete, größere Composite-Materialstück zurückbleibt. Dabei handelt es sich um einen mechanischen Trennvorgang.

4. Schritt: Das Materialstück wird nochmals kurz (ca. 15 s) mit Aceton gespült. Dadurch wird das Wasser verdrängt und die nachfolgende Trocknung beschleunigt, da Aceton bei Zimmertemperatur einen wesentlich höheren Dampfdruck als Wasser besitzt.

5. Schritt: Abschließend wird das erhärtete Material 24 Std. bei Zimmertemperatur getrocknet.

Die bei diesem Verfahren gewonnenen Materialproben entsprechen nun in ihrer räumlichen Ausdehnung dem erhärteten Materialanteil. Diese Materialproben sind nicht als vollständig homogen bezüglich ihrer chemischen und physikalischen Eigenschaften zu betrachten, da mit zunehmender Entfernung zur Blendenöffnung die Lichtintensität immer mehr abnimmt. Damit verbunden ist eine Zunahme des Restmonomers und u.a. eine Abnahme der Härte des Materials und des chemischen Vernetzungsgrades. Dadurch entsteht zwischen der Zone des vollständig erhärteten Materials und der des nicht erhärteten Composites ein Zwischenbereich, den man als "Gelzone" bezeichnen kann, gekennzeichnet durch hohen Restmonomergehalt und geringe Vernetzung. Das Gel ist trotz seiner geringeren Vernetzung immer noch in organischen Lösungsmitteln unlöslich.[7)]

In Folge dieser Unlöslichkeit ist diese Gelzone in den entstehenden Materialproben zum größten Teil erhalten.



Die Skizze zeigt einen Medianschnitt durch eine Materialprobe.

Die in dem folgenden Teil erklärten Meßwerte müssen demnach, da der Gelbereich bezüglich der erwünschten physikalischen und chemischen Eigenschaften als nicht vollwertig gelten kann, geringfügig nach unten korrigiert werden, wenn die Untersuchungsergebnisse für die Beurteilung von in-vivo-Situationen herangezogen werden sollen.

4.3 Auswertung der Materialproben und Hinweise zur Benutzung der Auswertungstabellen sowie der graphischen Darstellungen

Die Materialproben werden mit ihrer breitflächigen Seite auf eine plane Unterlage gelegt und streng von der Seite im Winkel von 90° mit einer einäugigen Spiegelreflexkamera mit Balgengerät fotografiert. Die Vergrößerung auf dem Negativ beträgt konstant 2x. Nach der Herstellung der Negative werden diese mit Hilfe eines Vergrößerungsgerätes mit zehnfacher Vergrößerung auf ein Millimeterpapier projeziert. Der fotografierte Körper kann nun bei insgesamt zwanzigfacher Vergrößerung mit einer Ablesegenauigkeit von $\pm$ 0,5 x 10^{-1} mm ausgemessen werden.

(Die Abbildungen auf der nächsten Seite veranschaulichen das Größenverhältnis. Sie zeigen Millimeterpapier in zwanzigfacher Vergrößerung und eine Probe erhärteten Materials im gleichen Maßstab.) Die Ergebnisse finden sich im nachfolgenden Auswertungsteil.
Jede Auswertungsserie entspricht einer Versuchssituation, gekennzeichnet durch die Konstanz folgender Größen bzw. Merkmale:

1. Fabrikat des Materials
2. Farbe des Materials
3. Durchmesser der Blendenöffnung
4. Zusätzliche Durchstrahlung einer 1 mm dicken Schmelzschicht

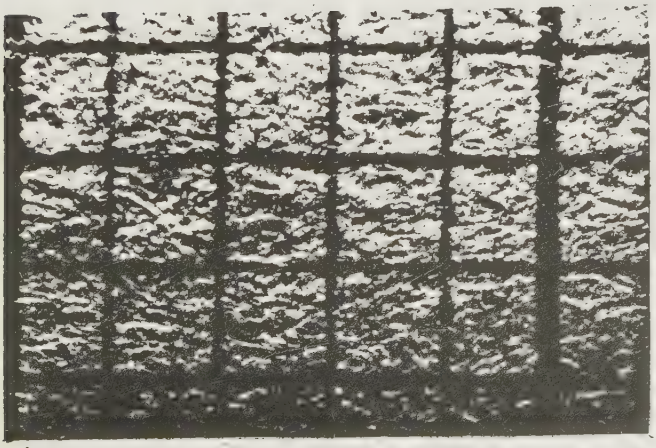
Jede Serie erhält eine fünfstellige Nummer, aus der die oben genannten Merkmale eindeutig hervorgehen.

Die erste Zahl gibt das Fabrikat an. Es bedeuten

1 ≙ Visio-dispers^R
2 ≙ Durafil^R
3 ≙ Fotofil^R

Die zweite Zahl gibt die Farbe an.

	Visio-dispers^R	Durafil^R	Fotofil^R
1	standard	universal	universal
2	hell (light)	-	-
3	braun	braun	-
4	grau	grau	-
5	-	universal-opak	-
6	-	braun-opak	-
7	-	grau-opak	-



Die dritte Zahl bezeichnet den Durchmesser der Blendenöffnung in Millimetern.

Die vierte Zahl bedeutet
1 ≙ mit Durchstrahlung einer 1 mm dicken Schmelzschicht
0 ≙ ohne Durchstrahlung einer 1 mm dicken Schmelzschicht

Die fünfte Zahl bezeichnet die Vergrößerung auf dem Filmnegativ und beträgt stets 2 x .

Im folgenden Abschnitt 4.4 finden sich die Tabellen für die Auswertung der einzelnen Serien. Hinter jeder Tabelle folgt eine graphische Darstellung der Ergebnisse. Die Tabellen verzeichnen die Auswertungsergebnisse in 10^{-1}mm. Gemessen wurden die Breite B, der Materialprobe in Abhängigkeit vom Abstand der zur Blende zugewandten Materialseite T. Tmax bezeichnet die maximale Aushärtungstiefe. Gemessen wird ab T = 0 jede 10^{-1}mm. Für jeden Meßwert wird zusätzlich das arithmetische Mittel M angegeben, außerdem die Standardabweichung S. Da die Materialproben in einem zylindrischen Probenhalter mit einem Innendurchmesser von 5,1 mm und einer Höhe von 4 mm gewonnen werden, erklärt sich der Umstand, daß Breiten der Materialstücke über 5,1 mm und maximale Aushärtungstiefen über 4 mm nicht verzeichnet sind. Die maximale Aushärtebreite Bmax erscheint, sofern ihre Angabe sinnvoll ist, als unterstrichener Wert in der Spalte der Mittelwerte der Aushärtebreiten.
Die jeweils folgende graphische Darstellung zeigt die Abhängigkeit zwischen Aushärtungstiefe T und Aushärtungsbreite B anhand von Mittelwerten. Zusätzlich werden im Abstand von höchstens 2 x 10^{-1}mm die Standardabweichung angezeigt. Links neben der graphischen Darstellung werden die Belichtungsverhältnisse angedeutet (Bl. ≙ Blende, Sch. ≙ Schmelzschicht). Spiegelt man die Kurve der Wertepaare an der T-Achse, so erhält man die durchschnittliche Seitenansicht der Materialproben im Maßstab von ungefähr 31 : 1 .

4.4 Ergebnisse der Versuchsserien in Tabellen und graphischen Darstellungen

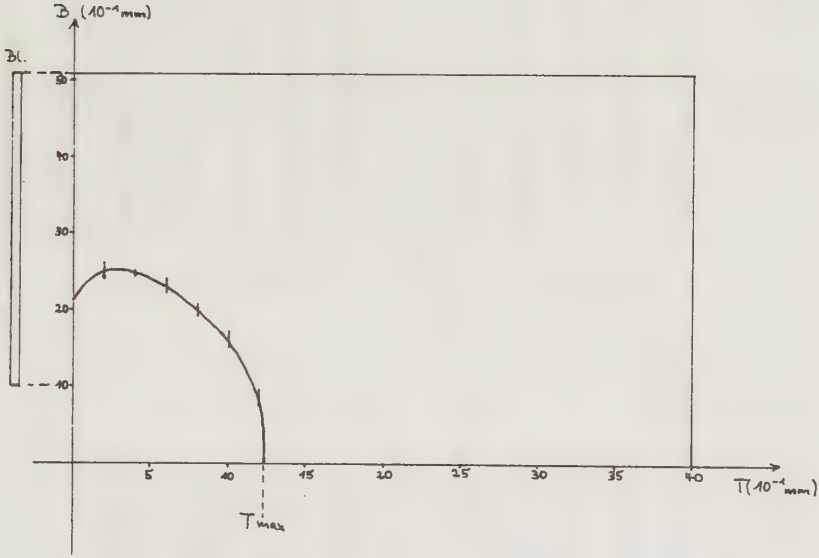
Auswertung No. 11102 n=25 (Teil 1)
Visio-dispersi standard
1 mm Blendendurchmesser
ohne Schmelzdurchstrahlung

No. 10^{-1} mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	22,5	22,5	22	21	21,5	23	20,5	20,5	20	20,5	21	22	20	21	20,5
1	25,5	25	24,5	24,5	24,5	25	23	23,5	23	23,5	24	24	24	24	23,5
2	25,5	25,5	25	25	25	26	24	24	24	24	25	25	24,5	24,5	24
3	26	26	25,5	25	25	26,5	24	24	24,5	24,5	25	25	24,5	25	24
4	25	25	24,5	24,5	24,5	26	24	24	24,5	24	24,5	24,5	24	24,5	23,5
5	24	24	23,5	24	24	25,5	23	23	23,5	23,5	24	25	23	24	22,5
6	23	23	22,5	22,5	23	25	22	22	22,5	23	23	23	22	23	21,5
7	22	21,5	21	21,5	22	23,5	20,5	21	21,5	21,5	22	22	21	22	20,5
8	20	20	29,5	20	20	22	19	19,5	20	20	20	20,5	19,5	20,5	19,5
9	18	18,5	17,5	18	19,5	20	17,5	17,5	18	18	18	19	18	19	17,5
10	16	16,5	15	16	17,5	18,5	15	15,5	15,5	15,5	15,5	16	15	16,5	15
11	14	14	12	13	15,5	16	12,5	12	13	12	12,5	14	12,5	14,5	12,5
12	8	7	5	6,5	9	10,5	8	7,5	9	9	6	10	8	9	7
13	8	0	0	0	2	4	0	0	0	0	0	2	0	4	0
Tmax	12,5	12,5	12	12,5	13	13	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	13	12,5	13	12,5

Auswertung No. 11102 n=25 (Teil 2)
Visio dispersi standard
1 mm Blendendurchmesser
ohne Schmelzdurchstrahlung

No. 10^{-1} mm	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	M	S
0	22	23	22	23	21	20,5	20,5	21	21	20,5	21,32	0,96
1	25	25	23,5	25	24	23	23,5	25	24	24	24,14	0,70
2	25,5	26	24	25,5	24,5	24	24,5	25,5	24,5	24,5	24,78	0,97
3	25,5	26	24,5	25,5	24,5	24	24,5	25,5	25	24,5	24,94	0,70
4	25	25,5	24	25	24	24	24	25	24,5	24	24,48	0,57
5	24,5	25	23	24,5	23	23,5	23	24	23,5	23,5	23,72	0,69
6	23,5	24	22	23,5	22	22,5	22	23	22,5	22,5	22,74	0,76
7	22,5	23	20,5	22	20,5	21	20,5	22	21,5	21,5	21,54	0,79
8	21	20,5	19,5	20,5	19	19,5	19	20,5	19,5	20	19,96	0,67
9	19,5	18	17,5	18	17,5	18	17,5	19	18	18,5	18,22	0,76
10	17,5	16	16	16	15	15	15	16,5	15,5	16	15,92	0,90
11	15	14	13	14	12,5	12,5	12,5	14	13	12,5	13,1	1,13
12	9	8	9	9	7	7	7	9	8	8	8,02	1,27
13	4	2	0	2	0	0	0	2	0	0	0,88	0,88
Tmax	13	13	12,5	13	12,5	12,5	12,5	13	12,5	12,5	12,61	0,29

Graphik zur Auswertung No.11102



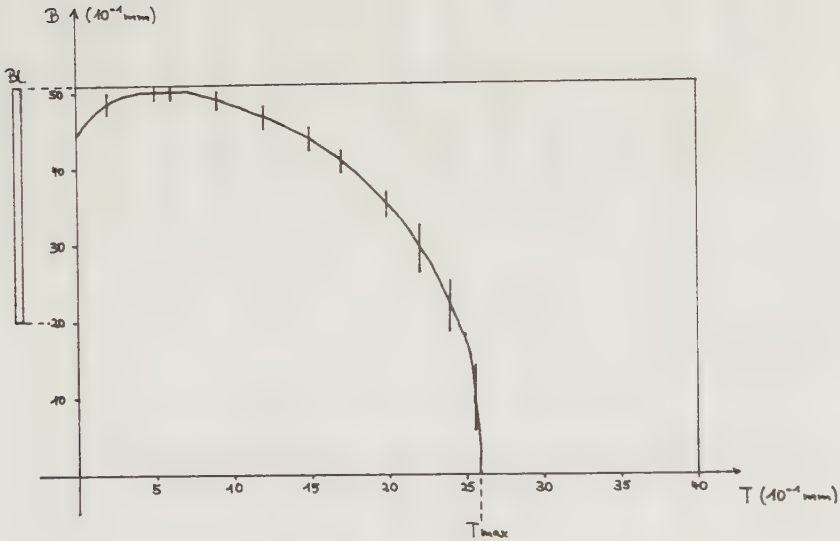
Auswertung No. 11202 n=25 (Teil 1)
Visio dispersR standard
2 mm Blendendurchmesser
ohne Schmelzdurchstrahlung

No. 10^{-1} mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	45	45	43	43,5	42,5	45	44	44	45	45	43	43,5	43,5	45,5	44
1	49	47	45	46	45,5	50	47,5	48	48,5	47	45	45	45,5	48,5	48
2	50	49	47	47,5	48	50,5	49	49	50	49	47	47	47	50	49
3	50,5	50	47,5	49	49	51	49	49	50,5	49	47,5	47,5	47,5	50,5	49,5
4	51	50	48	49	49	51	50	49,5	51	49	48	47,5	48	51	49,5
5	51	50,5	48,5	49,5	49,5	51	50	50	51	49,5	48	48	48	51	50
6	51	50,5	48	49,5	49,5	51	50,5	50	51	49,5	48,5	48,5	48,5	51	50
7	51	50	48	49,5	49,5	51	50	50,5	50	49,5	48	48	48	51	50
8	50,5	50	48	49	49	51	49,5	50	49,5	49	47,5	48	48	50,5	49,5
9	50	49	47,5	48,5	48,5	50,5	49	49,5	49	49	46,5	47,5	47,5	50	49
10	49,5	48	47	48	48,5	50,5	48,5	49	48,5	48,5	46	47	47	49,5	48,5
11	49	47	46,5	47,5	48	50	48	48	48	48	45,5	46,5	46	49	48
12	48	46	45	46,5	46,5	49	47	47	47,5	47,5	44,5	46	45	48,5	47
13	47	45	43,5	45	45	48	46	46	47	46,5	43	45,5	44	47,5	46
14	46	44	43	44,5	44	47,5	44,5	44,5	46	45	42	44,5	43,5	46	45
15	45	43	44	43,5	43	45	43	43,5	44,5	44	41	43,5	42,5	45	43,5
16	44	42	42,5	42,5	41,5	44,5	42	42	43,5	43	39,5	42	41,5	43,5	42
17	42,5	39,5	40	40	40	43	40	40	41,5	41,5	38,5	40,5	40	42	40
18	41	38	39	38	38,5	42	38	38,5	40	40	36	39	38	40	38,5
19	39,5	36,5	37,5	36	36,5	40	36	36	38,5	38	34	37,5	36	38	37
20	38	33	35	34	34	38	33	33,5	37	36	32,5	35	34	36	35
21	37	30	32,5	31,5	31	36	30,5	31	34,5	34	30	32	31,5	33,5	33
22	32,5	28	30	29	28,5	33	27,5	27,5	31	31	27	29	28,5	31	30,5
23	29	24	28	26,5	26	30,5	24,5	22	29	28,5	24	26,5	25,5	27,5	27,5
24	23	18	23	24	24	27	20	16	24	25	17	22,5	22	24	22,5
25	20,5	11	19	15	16	23	13	11	19	22	13,5	17,5	16	17,5	17,5
26	15	2	14,5	5	6	18	0	10	14	15	1	10	5	12,5	11
27	5	0	8	0	0	12	0	0	8	9	0	0	0	0	0
Tmax	27,5	26	27	26,5	26,5	27,5	25,5	26,5	27,5	27,5	26	26,5	26,5	26,5	26,5

Auswertung No. 11202 n=25 (Teil 2)
Visio dispersR standard
2 mm Blendendurchmesser
ohne Schmelzdurchstrahlung

No. 10^{-1} mm	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	M	S
0	44,5	43	44	45	43	45,5	44	45	43	44	44,1	0,93
1	48	45	48	48	45,5	48,5	46	48	46,5	48	47,08	1,47
2	50	46	49,5	49	46,5	49,5	47,5	49,5	47	49	48,46	1,32
3	50,5	47	50	49,5	47,5	50	48	50	47,5	49,5	49,06	1,77
4	50,5	47,5	50,5	50	48	50,5	48,5	50,5	48	49,5	49,4	1,21
5	51	48	50,5	50,5	48,5	51	49	51	48,5	50	49,74	1,14
6	51	48	50,5	50,5	49	51	49	51	48,5	50	49,84	1,03
7	51	48,5	50,5	50	49	51	49	50,5	48,5	50	49,7	1,06
8	51	48	50	49,5	48,5	51	48,5	50	48	49	49,3	1,04
9	51	47,5	49,5	49	48,5	51	48	49,5	47,5	48	48,82	1,16
10	50,5	46,5	49	48,5	48	50,5	47,5	48,5	47	47,5	48,3	1,21
11	50	45,5	48	48	47,5	50	47	47,5	46,5	46,5	47,68	1,33
12	49	45	47,5	47	47	49,5	46	46,5	45,5	46	46,8	1,32
13	48	44,5	46,5	46	46,5	48,5	45	45,5	44,5	45,5	45,9	1,32
14	47	43,5	45,5	45	46	47,5	44	44	43	44,5	44,88	1,34
15	45,5	42,5	44	43,5	45	46,5	42,5	42,5	41,5	43,5	43,64	1,27
16	44	41,5	43	41,5	43,5	45	41	41	40	42	42,3	1,36
17	42,5	39,5	42	40	42	44	39,5	39,5	38,5	40	40,66	1,43
18	41	38,5	40	38	40	42,5	38	38	37	38,5	39,04	1,52
19	30	36,5	38	36	38	40	36	36,5	35,5	37	37,18	1,48
20	37	34,5	36	34	35,5	38,5	34	34,5	33,5	35	35,08	1,64
21	34,5	32,5	34	32	33,5	36,5	32	32	31,5	33	32,78	1,90
22	32	29,5	32	29,5	30,5	33,5	29,5	29,5	28	29	29,88	1,79
23	29	26,5	29	26	28	28,5	26	26	25	26	26,76	1,99
24	22	22	24	23	21,5	25	21	22	21	23	21,98	2,62
25	19	15	20	20	19	22	16	18	15	19	17,38	3,07
26	13	3	13	13	11,5	15	5	9	8	11	9,58	4,93
27	0	0	1	1	0	8	0	0	0	0	2,08	3,73
Tmax	26,5	26	27	27	26,5	27	26	26,5	26	26,5	26,6	0,61

Graphik zur Auswertung No.11202



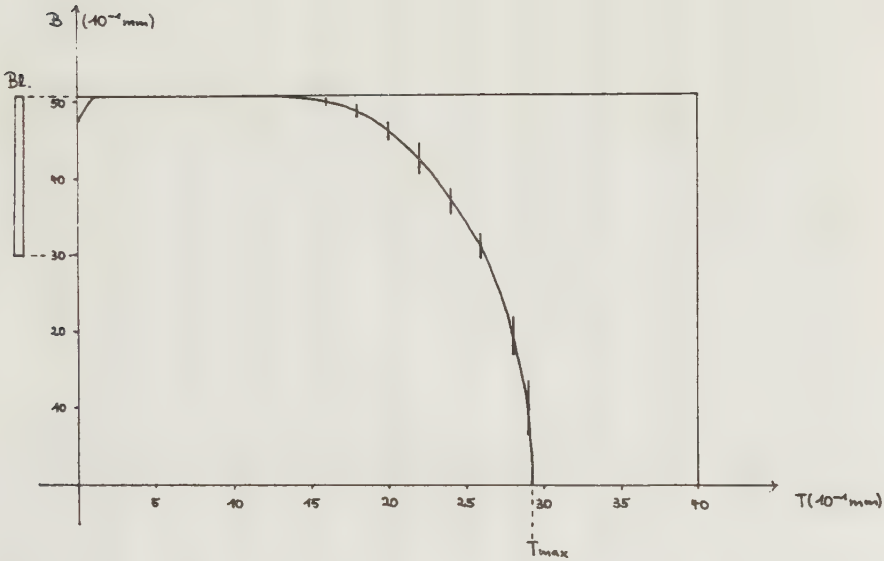
Auswertung No. 11302 n=25 (Teil 1)
Visio-dispers² standard
3mm Blendendurchmesser
ohne Schmelzdurchstrahlung

No. 10^{-1} mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	48	48	47,5	48	49	48	48	48	48	48	47	48	47	48	47
1	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51
2	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51
3	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51
4	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51
5	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51
6	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51
7	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51
8	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51
9	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51
10	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51
11	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51
12	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51
13	50,5	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51
14	50,5	50,5	50,5	50,5	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51
15	50	50,5	50,5	50,5	51	50,5	50,5	50,5	51	50,5	51	51	51	51	51
16	49,5	50	50	50	51	50,5	50	50	50,5	50	50,5	50,5	50,5	50,5	50
17	48,5	49	49,5	49,5	50,5	50	49	49	50	49	49,5	49,5	50	50	49
18	47,5	48	48,5	49	50	48,5	48	48,5	49,5	48	48,5	49	49,5	49	48
19	45,5	47	48	48	50	48	47	48	49	47,5	47,5	48	48,5	48	46,5
20	44	46	47	47	48,5	46,5	46	47	48	46	46	47	47,5	46,5	44,5
21	42,5	44	46	45,5	47	44,5	44,5	45	46,5	44,5	45	45	45,5	44,5	43
22	40	42	44,5	43	45	42,5	42	43	44,5	42,5	43,5	43	43	42,5	41,5
23	37	39,5	41,5	41	43	40	40,5	41	41,5	40	41,5	41	41	40,5	39,5
24	34,5	36	39	38	40,5	37	37	37,5	39	37	38,5	38	38	38	36
25	30,5	32	35,5	35	37,5	35	34	35	36	34	35,5	35	34,5	34,5	33
26	25,5	28	32	31,5	34,5	31	30,5	31,5	32	29,5	32	32	31	31	29
27	20,5	23,5	28	28	30	27	26	27	27,5	24	26	27	26	26	25
28	12	16	22,5	19	25	22	20,5	19	21,5	18	21	21	20	19	19
29	0	2	10	10	15	12	11	10	13	8	14	10	11	10	9
30	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tmax	28,5	29,5	29	29	30	29	29	29	29,5	29	29,5	29	29	29	29

Auswertung No. 11302 n=25 (Teil 2)
Visio dispers² standard
3 mm Blendendurchmesser
ohne Schmelzdurchstrahlung

No. 10^{-1} mm	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	M	S
0	47	47	47	47	46	47	47	48	47	47	47,5	0,64
1	51	51	51	51	50,5	51	51	51	51	51	50,98	0,1
2	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
3	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
4	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
5	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
6	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
7	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
8	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
9	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
10	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
11	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
12	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
13	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
14	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	50,98	0,1
15	50,5	51	51	51	51	50,5	50,5	51	51	51	50,92	0,18
16	50	50,5	50,5	50,5	50,5	50	50	50,5	50,5	50,5	50,76	0,30
17	49	50	50	50	50	49	49	50	50	50	50,28	0,33
18	48	49	49,5	49	49,5	48	48	49,5	49,5	49	49,56	0,51
19	47	47,5	48,5	47,5	48,5	47	47	48,5	49	47,5	48,74	0,67
20	46	46,5	47,5	46	47	45,5	45,5	47	48	46	47,78	1,14
21	44	45	45,5	44,5	45	43,5	44	45,5	46,5	44,5	46,5	1,04
22	42	43	43,5	42,5	43	42	41,5	43,5	44	43	44,84	1,06
23	40	40,5	41	40	40,5	40	39,5	41	42	41	42,82	1,09
24	37	38	39	37	38	37	37,5	38,5	39	39	40,54	1,11
25	33,5	34,5	35	34	35	33	34	35	36	35,5	37,76	1,23
26	30	31,5	31	30	31,5	29	30,5	31	31,5	32	34,5	1,40
27	24,5	26,5	26	25	27	25	26	27	28	27,5	30,76	1,51
28	19	21	21	18,5	21	18	21	21,5	22	21	26,16	1,86
29	7	13	11	9	12	8	10	11	12	10	19,98	2,43
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10,32	3,31
											0,32	1,60
Tmax	29	29,5	29	29	29,5	29	29	29	29	29,5	29,14	0,31

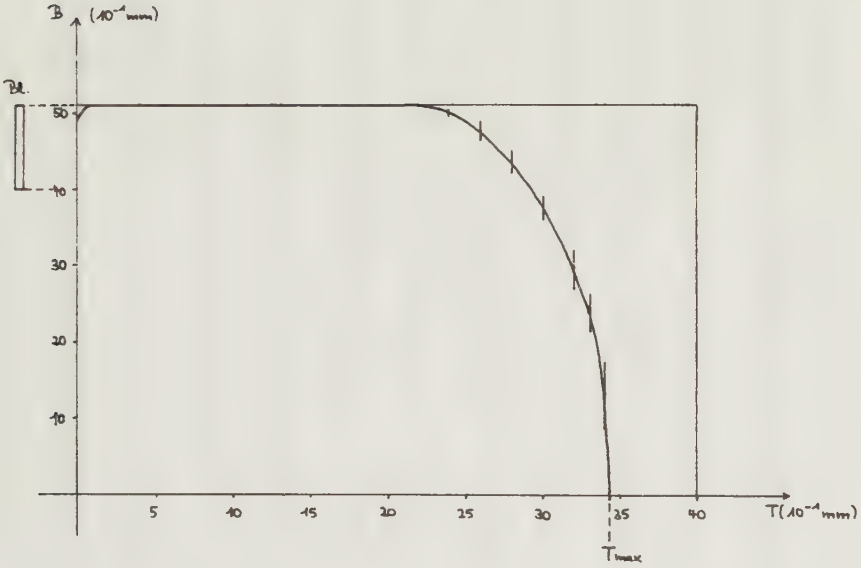
Graphik zur Auswertung No.11302



Auswertung No. 11402 n=10
Visio dispers[R] standard
4 mm Blendendurchmesser
ohne Schmelzdurchstrahlung

No. 10^{-1}mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	M	S
0	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	0
1	51	51	51	51	51	51	51	50,5	51	51	50,95	0,16
2	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
3	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
4	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
5	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
6	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
7	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
8	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
9	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
10	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
11	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
12	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
13	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
14	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
15	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
16	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
17	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
18	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
19	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
20	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
21	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
22	51	51	51	51	51	50,5	50,5	51	51	51	50,9	0,21
23	51	51	50,5	50,5	50,5	50	50	50,5	51	50,5	50,55	0,37
24	50,5	50,5	49,5	50	50	49	49	50,5	50,5	50	49,95	0,59
25	50	49,5	48,5	48,5	49,5	47,5	47	50	49,5	48,5	48,85	1,03
26	49	48	47	46,5	48	45	45	49	48	47,5	47,3	1,43
27	47	46	45	45	46,5	43	43	47	46	46	45,45	1,47
28	44,5	43,5	42	43	44	41	40,5	45	44	44	43,15	1,50
29	42	41,5	40,5	40	42	38,5	37,5	43	41,5	41,5	40,8	1,70
30	39	38	36,5	37	38	34,5	34,5	40	39	38	37,45	1,84
31	35,5	35	32,5	32,5	34	31	31,5	36	35,5	35	33,85	1,82
32	30	29,5	28	28	29	26,5	27	30,5	31,5	30	29	1,59
33	25	24	22	22	22	19,5	20,5	25	25,5	23	22,85	2,01
34	14	13	10	11	12	0	12	13	14,5	13	11,25	4,17
Tmax	34,5	34,5	34	34	34	33,5	34,5	34,5	34,5	34,5	34,25	0,36

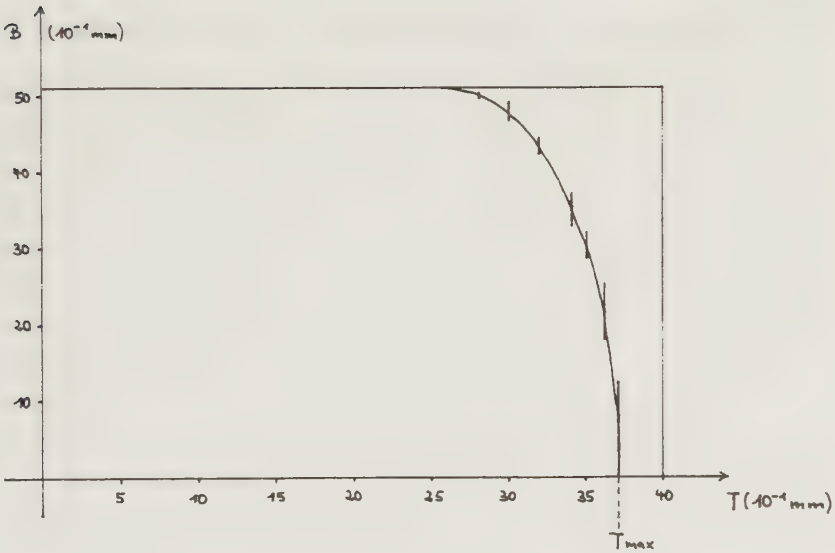
Graphik zur Auswertung No.11402



Auswertung No. 11502 n=10
Visio dispers[R] standard
5,1 mm Blendendurchmesser
ohne Schmelzdurchstrahlung

10^{-1} mm \ No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	M	S
0	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
1	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
2	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
3	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
4	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
5	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
6	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
7	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
8	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
9	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
10	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
11	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
12	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
13	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
14	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
15	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
16	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
17	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
18	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
19	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
20	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
21	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
22	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
23	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
24	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
25	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
26	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
27	50,5	50,5	51	51	50,5	50,5	51	50,5	51	50,5	50,7	0,24
28	49	49,5	50,5	50,5	50	49,5	50,5	50,5	50,5	50	50,05	0,55
29	47	48,5	50	50	49	49	50	49,5	50	49,5	49,25	0,95
30	45,5	46,5	49	47,5	47	47,5	48,5	47	49,5	48	47,6	1,19
31	44	44,5	47,5	45,5	45	45,5	47	44,5	48,5	45,5	45,75	1,45
32	41,5	41,5	44,5	43	43,5	44	45	42,5	45	43	43,25	1,31
33	39	38,5	41,5	39	39,5	40,5	41,5	39,5	41,5	40	40,05	1,14
34	34	33	38	34	36	36,5	37,5	35	38	36	35,8	1,77
35	29	27	33	27	31	30	31,5	30	33,5	30,5	30,25	2,19
36	21,5	17	28	17	24	22	25	24	27,5	22,5	22,85	3,75
37	10	0	16	0	14	8	12	10	15	9	9,4	5,60
Tmax	37	36,5	37,5	36,5	37	37	37,5	37	37,5	37	37,05	0,37

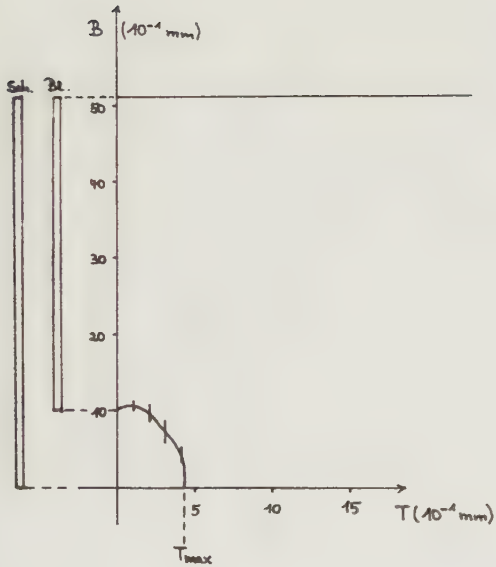
Graphik zur Auswertung No.11502



Auswertung No. 11112 n=8
Visio dispers^{R} standard
1 mm Blendendurchmesser
mit Schmelzdurchstrahlung

No. 10^{-1} mm	1	2	3	4	5	6	7	8	M	S
0	11	10	10	10	10	10	10	10	10,13	0,35
1	11,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10	10	10,5	0,46
2	11	10	10	9,5	9,5	8	9	9,5	9,56	0,87
3	10,5	7	8,5	7	7,5	5	6	7,5	7,37	1,65
4	8,5	4	5,5	4	5	3	4	5	4,8	1,67
5	3,5	0	0	0	0	0	0	0	0,44	1,23
Tmax	5	4	4,5	4	4	4	4	4	4,19	0,37

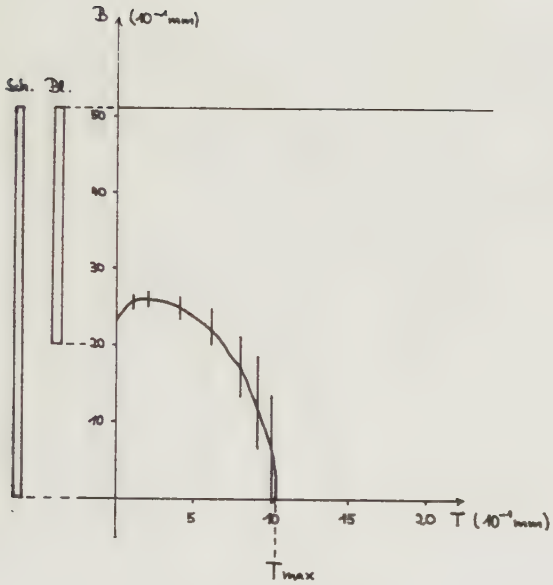
Graphik zur Auswertung No.11112



Auswertung No. 11212 n=9
Visio dispers^{R} standard
2 mm Blendendurchmesser
mit Schmelzdurchstrahlung

No. 10^{-1} mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	M	S
0	21	22,5	24	23,5	24	23	23,5	24	23	23,17	0,97
1	23,5	25	27	26	26	26,5	26,5	26,5	25	25,78	1,08
2	23,5	25	27	26	26	27	27	26,5	26	26	1,15
3	22,5	24	26,5	25	25,5	26,5	27	26,5	26	25,5	1,39
4	21,5	23	26	24	24,5	26	26,5	26	25,5	24,78	1,68
5	19,5	22	25	22,5	23	25	25,5	25	25	23,61	2,02
6	17	21	24	21	21	24	24	24	24	22,22	2,44
7	13,5	19	21,5	18,5	18,5	23	23	22,5	22,5	20,22	3,16
8	8	16	19	15	15,5	21	21	20	20	17,28	4,21
9	0	5	16	4	7	19	17	16	17,5	11,28	7,19
10	0	0	9	0	0	16	13	11	13,5	6,94	6,84
11	0	0	0	0	0	8	4	3	7	2,44	3,24
Tmax	8,5	9,5	10	9,5	9,5	11,5	11	11,5	11,5	10,27	1,18

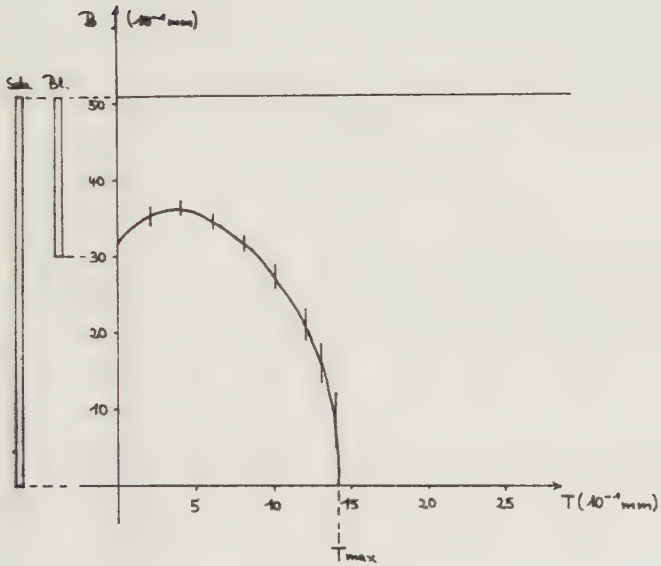
Graphik zur Auswertung No.11212



Auswertung No. 11312 n=10
Visio dispers^{R} standard
3 mm Blendendurchmesser
mit Schmelzdurchstrahlung

No. 10^{-1} mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	M	S
0	32	30	32	31,5	34	31	31	31	30,5	32	31,5	1,10
1	36	34	37,5	35,5	37	35	34	33,5	32,5	35,5	35,05	1,57
2	37	35,5	38	37	37,5	36	34,5	35	33,5	36,5	36,05	1,52
3	37	35,5	38	37	37,5	35,5	35,5	35,5	34	36,5	36,2	1,20
4	36,5	35	37,5	36,5	37	34,5	34,5	35,5	34	36,5	35,75	1,21
5	36	34	36,5	35,5	36,5	34	34	35	33,5	35,5	35,05	1,11
6	35	33	35,5	34,5	35,5	33	33	34,5	32,5	35	34,15	1,16
7	34	32	34,5	33,5	34,5	31	31	33	31,5	34	32,9	1,40
8	32	30,5	33	32,5	33	29	30	32	30	32	31,4	1,45
9	30,5	29	31	30,5	31,5	27	29	30,5	28	29,5	29,65	1,41
10	28	26	28,5	28	29	24	26,5	28,5	26	27,5	27,12	1,55
11	25,5	23	26,5	25,5	26	20	23	26	23	25	24,35	2,04
12	22	18	22,5	22,5	22	17	20	22	20	21,5	20,45	2,08
13	17,5	13	18	17	18	9	14	17	16	16,5	15,6	2,85
14	10	0	12	9	10	0	0	9	6	8	6,4	4,35
Tmax	14	13,5	14,5	14,5	14	13,5	13,5	14,5	14	14	14	0,41

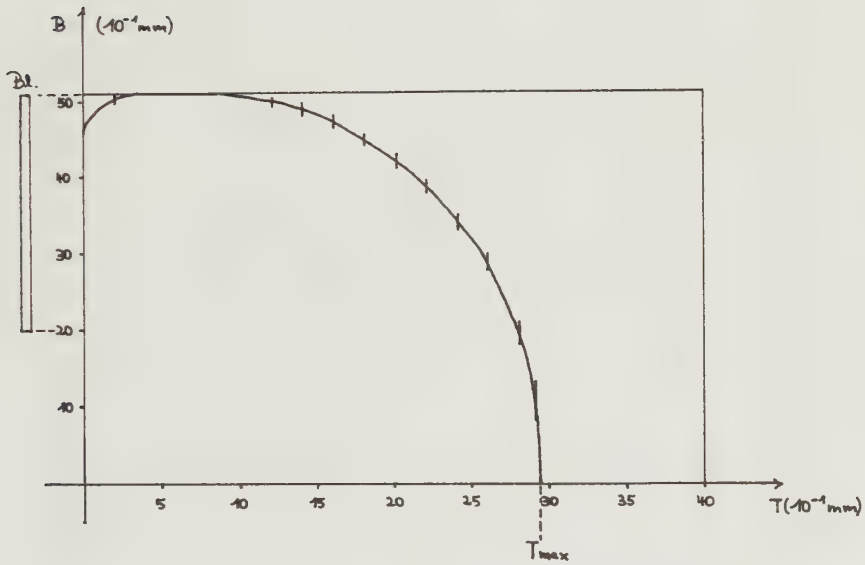
Graphik zur Auswertung No.11312



Auswertung No. 12202 n=10
Visio dispers^{R} hell (light)
2 mm Blendendurchmesser
ohne Schmelzdurchstrahlung

No. 10^{-1} mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	M	S
0	46,5	45	49	46	46	46	46,5	46,5	45	45	46,15	1,18
1	49,5	49,5	50,5	49,5	49,5	49,5	50	49	49	48	49,4	0,64
2	51	51	51	51	51	51	51	50	50	49,5	50,55	0,60
3	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
4	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
5	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
6	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
7	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
8	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
9	50,5	50,5	51	51	51	51	51	51	50,5	50,5	50,8	0,31
10	50	50	51	50,5	50,5	51	51	50,5	50	50	50,4	0,45
11	49,5	49,5	51	50	50	51	51	50,5	49,5	49,5	50,1	0,67
12	49	49,5	50,5	49,5	49,5	50,5	51	50	49	49	49,75	0,72
13	48,5	49,5	50,5	49,5	49	50	50,5	50	49	48,5	49,55	0,75
14	48	49	50,5	49	48,5	49	50	49,5	48,5	47,5	48,95	0,56
15	47	48	49,5	48,5	48	48	49	48,5	47,5	46,5	48,05	0,90
16	46	47	48,5	48	47	47	48	47,5	47	45,5	47,15	0,87
17	45	46	47	47	46	46	47	46,5	46	44,5	46,1	0,84
18	44	45	45,5	45,5	45	45	46	45	45	43,5	44,95	0,73
19	43	44	44,5	44,5	44	44	44,5	44	44	42,5	43,9	0,65
20	41	42,5	43	43	42,5	42,5	43	42,5	43	41,5	42,45	0,69
21	39	40,5	41,5	41,5	41	41	41,5	40,5	41	40	40,75	0,84
22	37	38,5	39,5	39,5	39,5	39	39,5	39	39	38	38,85	0,82
23	35	36,5	37,5	37,5	37	37	37,5	37	37,5	36	36,85	0,82
24	33	34	35	35	35	35	35,5	34	34,5	34	34,5	0,74
25	30	31	32	32	31,5	32,5	32,5	31	32,5	30,5	31,55	0,87
26	27	28	29,5	30	28,5	29,5	30	28,5	29,5	27,5	28,8	1,05
27	23	23,5	24,5	26	24	25,5	26	24	25,5	24	24,6	1,08
28	18	18,5	19	19,5	18,5	21	22	20	20,5	18,5	19,55	1,30
29	11	10,5	10	13	10,5	14	13	12,5	13	11	11,85	1,39
30	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0,1	0,32
Tmax	29,5	29	29	29,5	29,5	30	29,5	29,5	29,5	29,5	29,45	0,28

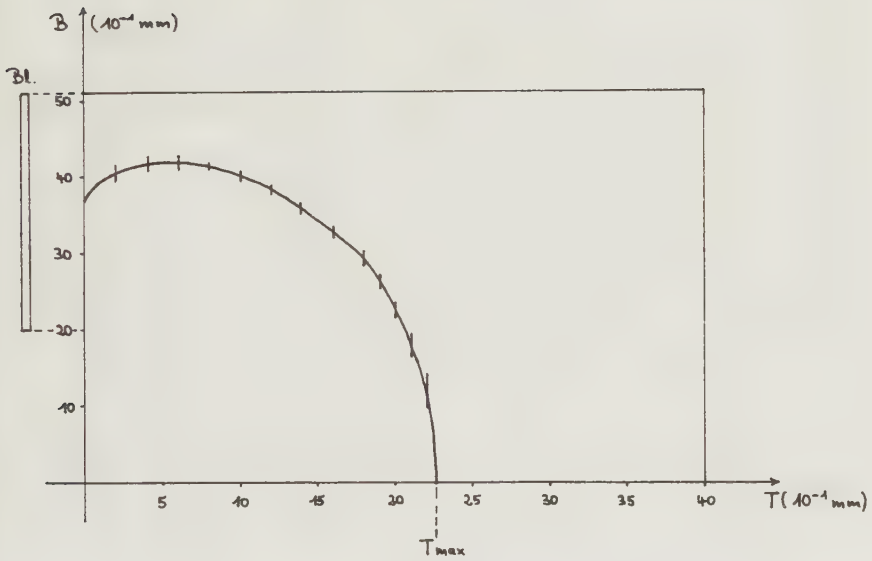
Graphik zur Auswertung No.12202



Auswertung No. 13202 n=9
Visio dispers^{R} braun
2 mm Blendendurchmesser
ohne Schmelzdurchstrahlung

No. 10^{-1}mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	M	S
0	36,5	35	37	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	38	37,11	0,89
1	39	36	38,5	40	39,5	39,5	40	40	41	39,27	1,42
2	40,5	37,5	40	41	41	40,5	41,5	41	42	40,55	1,28
3	41	38,5	40,5	42	41,5	41,5	42	41,5	42,5	41,26	1,18
4	41,5	39	40,5	42	42	41,5	42,5	42	42,5	41,5	1,11
5	41,5	39,5	40,5	42	42	41,5	42,5	42	42,5	41,55	1,04
6	41,5	39,5	40,5	42	42	41,5	42,5	42	42,5	41,55	1,04
7	41,5	39,5	40,5	42	41,5	41	42	41,5	42	41,27	0,84
8	41	39	40,5	41,5	41,5	40,5	41,5	41,5	41,5	40,94	0,85
9	40,5	38,5	40	41	41	40	41,5	41	41,5	40,55	0,95
10	40	38	39,5	40,5	40,5	39,5	40,5	40,5	40,5	39,94	0,85
11	39	37,5	38,5	40	39,5	38,5	39,5	39	39,5	38,88	0,88
12	38	36,5	38	38,5	38,5	38	38	38	38,5	38	0,62
13	37	35,5	37	37,5	37	36,5	37	37	37,5	36,88	0,60
14	36	34,5	35,5	36,5	36	35,5	36	36	35,5	35,72	0,56
15	35	33	34	35,5	34,5	33,5	34,5	34,5	34,5	34,33	0,73
16	33,5	31,5	33	33,5	33	31,5	32,5	33	32,5	32,66	0,75
17	32	29	32	31	31,5	29,5	30,5	31,5	30,5	30,83	1 06
18	30	27	29	29	29	27	28,5	29	28,5	28,55	0,99
19	27	24	25	26,5	26,5	24	25,5	27	25	25,61	1,19
20	23,5	20	22	23	22,5	20	21,5	23,5	21,5	21,94	1,33
21	20,5	16	17,5	19,5	19,5	16,5	18,5	20	16,5	18,27	1,70
22	15,5	10	11	12	12	8	12	15	13	12,06	2,32
23	10,5		0	0	0	0	0	6	0	1,88	3,82
Tmax	23	22,5	22,5	22,5	22,5	22,5	22,5	23	22,5	22,61	0,22

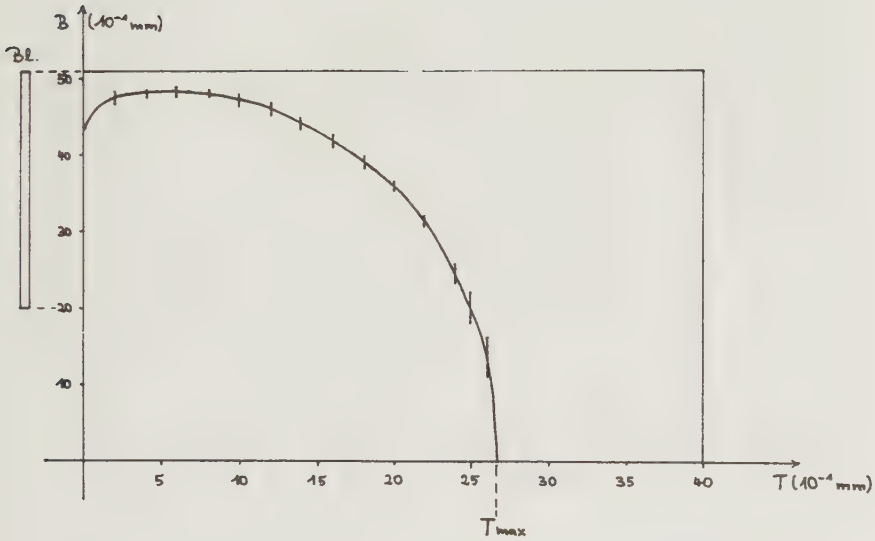
Graphik zur Auswertung No.13202



Auswertung No. 14202 n=10
Visio dispers^{R} grau
2 mm Blendendurchmesser
ohne Schmelzdurchstrahlung

No. 10^{-1}mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	M	S
0	44,5	42,5	42	43	42,5	44	43	42,5	44	42,5	43,05	0,83
1	47	46	46	46	45,5	48,5	47	45,5	49	44	46,45	1,47
2	48,5	47,5	47,5	47,5	47	49	47	46,5	49	46	47,55	0,96
3	48,5	48	47,5	48	47	49	47,5	47	49	46,5	47,88	0,85
4	48,5	48	48	48,5	47,5	49	47,5	47	49	47,5	48,05	0,68
5	48,5	48	48	48,5	47,5	49	47,5	47	49	47,5	48,05	0,68
6	48	48	48	49	47,5	49	47	47	49	47,5	48	0,78
7	48	48	48	49	47,5	49	47	47	49	47,5	48	0,78
8	48	48	48	49	47,5	48,5	47	47	49	47,5	47,85	0,73
9	47,5	47,5	47,5	48,5	47	48,5	47	46	49	47,5	47,6	0,92
10	47	47	47	48,5	47	48,5	47	45,5	48,5	47	47,3	0,95
11	46,5	46,5	46,5	48	46,5	48	46	45,5	48	46,5	46,8	0,89
12	46	45,5	45,5	47,5	46	47	45,5	44,5	47	46	46,05	0,90
13	45,5	45	45	46,5	45	45,5	44,5	43,5	46	45	45,15	0,82
14	44,5	44,5	44,5	45,5	44,5	44,5	43,5	42,5	45	44	44,3	0,82
15	43,5	43	43	44,5	43,5	43,5	42,5	41,5	44	43	43,2	0,82
16	42	41,5	42	43,5	42,5	42,5	41	41	43	42	42,1	0,81
17	40,5	40,5	40,5	41,5	40,5	41,5	40	39,5	41,5	41	40,7	0,67
18	39,5	39,5	39,5	40	39	39,5	38	37,5	40	39,5	39,25	0,82
19	37,5	37,5	37,5	38,5	38	38	37	36	38,5	38	37,65	0,75
20	35,5	35,5	36	37	36	36	35	34	36,5	35,5	35,7	0,82
21	33,5	33,5	34	34,5	34	34	33	32,5	34,5	34	33,75	0,63
22	30,5	31	31,5	32	31,5	31,5	31	30	32	31	31,2	0,63
23	27	27,5	28,5	29	29	28	28	27	29	27,5	28,05	0,80
24	22,5	22	23,5	24	26	24,5	25,5	24	25	22,5	23,95	1,34
25	17	17	21	21	21,5	20	20	19	20	17	19,35	1,76
26	9	10	12	13	17	15	15,5	12	15,5	11	13	2,65
27	0	0	0	0	8	4	7	0	5	0	2,4	3,26
Tmax	26,5	26,5	26,5	26,5	27	27	27	26,5	27	26,5	26,7	0,25

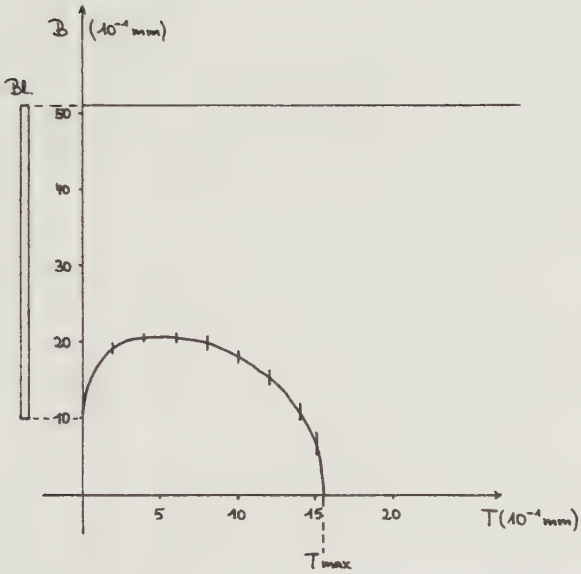
Graphik zur Auswertung No.14202



Auswertung No. 21102 n=9
Durafil[R] universal
1 mm Blendendurchmesser
ohne Schmelzdurchstrahlung

No. 10^{-1} mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	M	S
0	10	11	11	11	10	10	10	11	10	10,44	0,53
1	14,5	16,5	16,5	17,5	17	17,5	18	18	17,5	17	1,09
2	18	19	19,5	19,5	19	19,5	20	20	20	19,38	0,64
3	19	21	20,5	21	20,5	20,5	20,5	20	21	20,55	0,65
4	20	21	20,5	21	20,5	20,5	20,5	20,5	21	20,61	0,33
5	20,5	21	20,5	21	21	20,5	20,5	20,5	21	20,72	0,27
6	20,5	21	20,5	21	21	20	20,5	20,5	21	20,66	0,35
7	20,5	21	20,5	21	20,5	20	20	20	21	20,61	0,45
8	20	20,5	20	20,5	20	19	20	20	20,5	20,06	0,65
9	20	20	19,5	19,5	19,5	18	19	19	19,5	19,33	0,61
10	19	19	18,5	18,5	18	17	18	18	18,5	18,27	0,61
11	18	18	17	17	17	15,5	17	17	17,5	17,11	0,74
12	16,5	16,5	15,5	15,5	15,5	14	15	15,5	16	15,55	0,76
13	15	14,5	13,5	13,5	13	12,5	13	13	14	13,55	0,80
14	13	12,5	10,5	10,5	10	9,5	10,5	10,5	11,5	10,94	1,16
15	9	8,5	7	6,5	5,5	4	5,5	6,5	8,5	6,77	1,66
16	5	4,5	0	0	0	0	0	0	4	1,5	2,25
Tmax	16	16	15,5	15,5	15,5	15,5	15	15	16	15,56	0,39

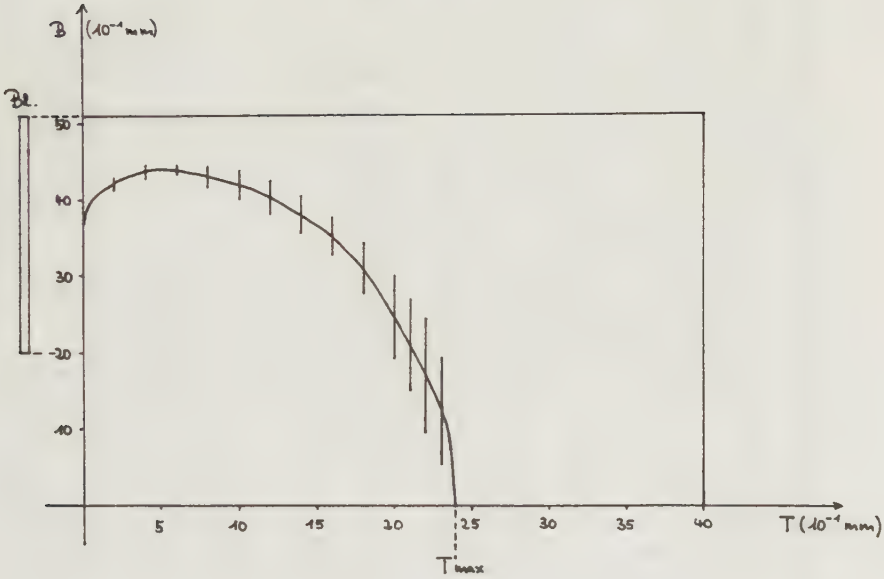
Graphik zur Auswertung No.21102



Auswertung No. 21202 n=10
Durafil[R] universal
2 mm Blendendurchmesser
ohne Schmelzdurchstrahlung

No. 10^{-1}mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	M	S
0	40	37	37	37,5	37,5	37	36	36	36,5	37	37,15	1,13
1	43,5	40,5	39	41,5	41	39,5	40,5	39	41	41,5	40,65	1,36
2	44	42,5	41,5	43,5	44	41,5	43	41	42,5	44	42,8	1,14
3	44	42,5	42,5	45	45	42,5	44,5	42	43,5	45	43,65	1,17
4	44	42,5	42,5	45	45	42,5	45	43	44	45	43,85	1,13
5	43,5	42,5	42,5	45	45	42,5	45	43	44	45	43,8	1,14
6	43	42	42,5	45	45	42,5	45	43	44	45	43,7	1,23
7	42,5	41,5	42,5	44,5	45	42	45	43	44	45	43,5	1,34
8	41,5	40,5	42	44,5	44,5	41,5	44,5	43	44	45	43	1,61
9	40,5	39,5	41,5	44	44,5	41,5	44	42,5	43,5	44,5	42,6	1,77
10	39,5	38,5	41	43,5	44	41	43,5	42	43	43,5	41,95	1,89
11	38,7	37,5	40,5	43,5	43	40,5	42	41	42,5	42,5	41,25	2,03
12	37,5	36,5	39,5	43	42	39,5	42,5	40	42	41,5	40,4	2,18
13	36,5	35,5	38,5	41,5	41	38,5	41,5	39	40,5	40,5	39,3	2,09
14	34	33,5	37,5	40,5	40	37	40,5	38	39	39	37,9	2,48
15	32	31,5	36	39	39	36,5	38,5	36,5	38	37,5	36,45	2,68
16	30,5	29,5	34	38	38	34,5	37	35	36,5	36	34,95	2,92
17	28	26,5	32	36	36	32,5	35,5	33,5	35	34,5	32,95	3,42
18	25,5	23	30	34	34,5	30,5	33,5	32	33,5	33	30,95	3,85
19	21,5	18	27,5	32	32	28	31,5	29,5	30,5	30,5	28,1	4,73
20	17	12	22,5	29,5	30	23	28,5	26,5	28	28	24,5	5,95
21	11	6	20	26,5	27	20	25	23,5	24,5	25	20,85	7,00
22	0	0	16	23,5	24	15	21	20	21	21	16,15	8,92
23	0	0	10	20	21	8	17	16	17	17	12,6	7,74
24	0	0	0	14,5	13	0	8,5	5	9	8	5,8	5,62
25	0	0	0	7	6	0	0	0	0	0	1,3	2,75
Tmax	21,5	21	23,5	25,5	25,5	23,5	24,5	24,5	24,5	24,5	23,85	1,53

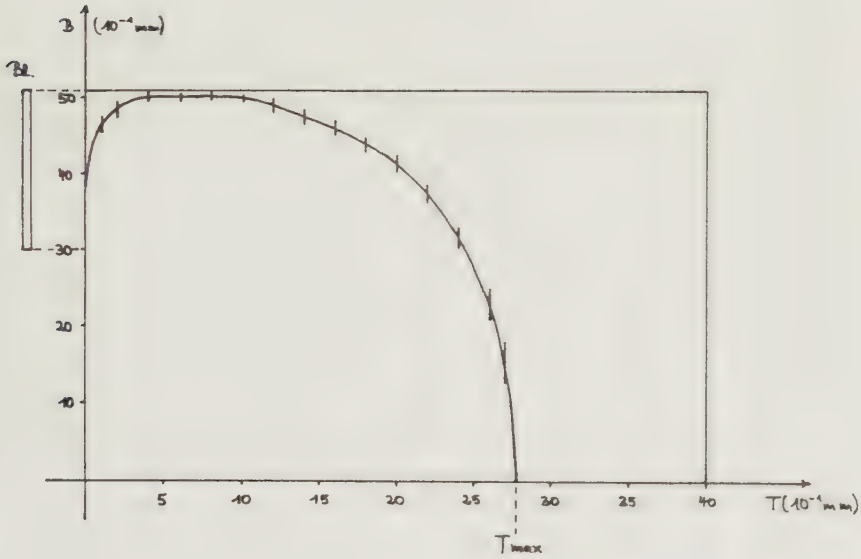
Graphik zur Auswertung No.21202



Auswertung Nd. 21302 n=10
Durafil[R] universal
3 mm Blendendurchmesser
ohne Schmelzdurchstrahlung

No. 10^{-1} mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	M	S
0	40	40	39	39	40	38	40	40	39	38	39,3	0,82
1	50	45	46	45,5	46,5	46,5	46,5	46,5	48	46	46,65	1,41
2	51	46	48,5	48	48	49	48	50	50	47,5	48,6	1,44
3	51	47	50	49,5	50	50	50	51	50,5	49,5	49,85	1,12
4	51	48	50,5	49,5	50	50,5	50,5	51	50,5	49,5	50,1	0,91
5	51	49,5	50,5	49,5	50	50,5	51	51	50,5	49,5	50,3	0,63
6	51	50	50,5	49,5	50	50,5	51	51	50,5	49,5	50,35	0,58
7	51	50	50,5	49,5	50	50,5	51	51	50,5	49,5	50,35	0,57
8	51	50	50,5	49,5	50	50,5	51	51	50,5	49,5	50,35	0,57
9	51	50	50,5	49,5	50	50,5	51	51	50,5	49,5	50,35	0,57
10	51	49,5	50	49	50	50,5	51	50,5	50	49	50,05	0,73
11	50,5	49	49,5	48,5	49,5	50	50,5	50	49,5	48,5	49,55	0,73
12	50	48,5	49	48	49	49,5	50,5	49,5	49	48	49,1	0,81
13	49,5	47,5	48,5	47	48,5	49	50	48,5	48,5	47,5	48,45	0,92
14	49	47	47,5	46	48	48,5	49,5	47,5	48	47	47,8	1,03
15	48	46	47	45	47,5	48	49	46,5	47,5	46,5	47,1	1,15
16	47	45	46	44,5	47,5	47,5	48	45,5	47	46	46,4	1,17
17	46	44	45	43,5	46	46	47	44,5	46	45	45,3	1,09
18	45	43	44	42,5	45	45	45,5	43,5	45	44,5	44,3	1,00
19	43,5	41	43	41,5	43,5	43,5	44	43	44	43,5	43,05	1,01
20	41,5	39,5	41,5	40,5	41,5	41,5	43	41,5	43	42	41,55	1,04
21	39,5	37,5	39,5	39	40	40	40,5	40	41	40,5	39,75	0,98
22	36	35	37,5	37	38	38	38	38	39	38	37,45	1,17
23	33,5	33	34,5	34,5	35,5	35,5	35,5	35,5	36,5	35,5	34,95	1,06
24	29,5	28,5	32	31	32	32	31,5	32	33,5	32,5	31,45	1,46
25	25,5	25	27	27	28	28	28	28,5	30	28,5	27,55	1,48
26	20,5	21	22,5	23	24	24	23,5	24	25,5	24	23,2	1,51
27	12	13	15,5	16	18	16,5	16	18	20	17	16,2	2,36
28	0	0	8	8	6	7	5	8	9	6	5,7	3,24
Tmax	27,5	27,5	28	28	28	28	28	28	28	28	27,9	0,21

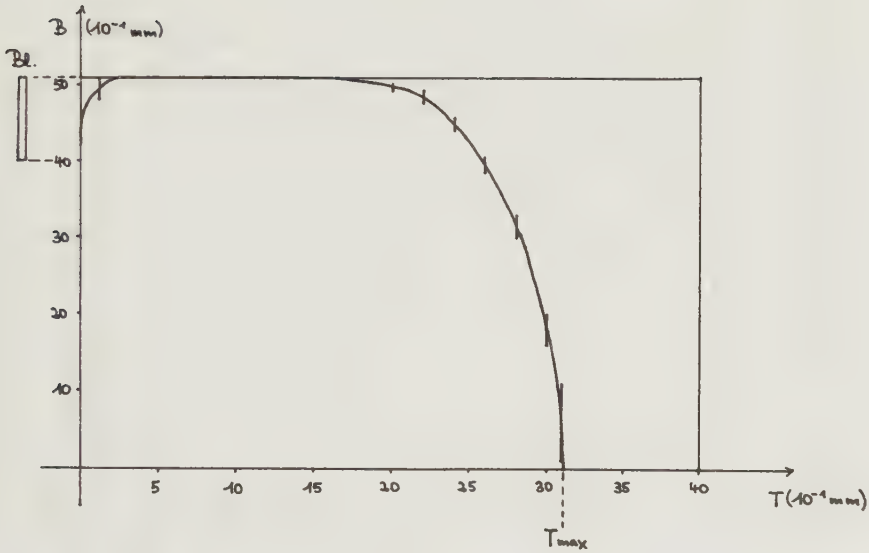
Graphik zur Auswertung No.21302



Auswertung No. 21402 n=10
Durafil^{R} universal
4 mm Blendendurchmesser
ohne Schmelzdurchstrahlung

No. 10^{-1} mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	M	S
0	44,5	45	44,5	43	43,5	45	43	45	43	45	44,15	0,91
1	51	51	50	48,5	47	51	47	51	48	50,5	49,5	1,66
2	51	51	51	50	49,5	51	49,5	51	50	51	50,5	0,66
3	51	51	51	50,5	51	51	50,5	51	51	51	50,9	0,21
4	51	51	51	50,5	51	51	51	51	51	51	50,95	0,16
5	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
6	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
7	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
8	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
9	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
10	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
11	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
12	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
13	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
14	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
15	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
16	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
17	51	51	51	51	51	50,5	51	51	51	51	50,95	0,16
18	51	50,5	50,5	50,5	51	50	51	51	51	50	50,65	0,41
19	50,5	50	50	50	50,5	49,5	50,5	50,5	50,5	49	50,1	0,51
20	50	49	49,5	50	50	49	50	50	50	48,5	49,6	0,57
21	49	48	48	49,5	49,5	48	49,5	49	49	47	48,65	0,87
22	48	46,5	47	48,5	49	47	49	47,5	48	46	47,65	1,03
23	46,5	45	46	47,5	48	45,5	48	46	47	44	46,35	1,31
24	45	44	44,5	46	46	43,5	46,5	44	45,5	42	44,75	1,38
25	43	42	42,5	44	43	40,5	44	41,5	43	40	42,35	1,36
26	40,5	40	40	41,5	40	38,5	41,5	39	40,5	37	39,85	1,37
27	37,5	36,5	36,5	38,5	37	35	38,5	35	37	33,5	36,5	1,60
28	33	33	32	34	32,5	29,5	34	31	33,5	29,5	32,2	1,69
29	27,5	27,5	27	28,5	27	25	27,5	26	28	23	26,7	1,63
30	18	20	18	20	20	17	20	17	18,5	15	18,35	1,70
31	10	11	8	11	11	7	10	0	8	0	7,6	4,25
Tmax	31	31,5	31	31	31,5	31	31	30,5	31	30,5	31	0,33

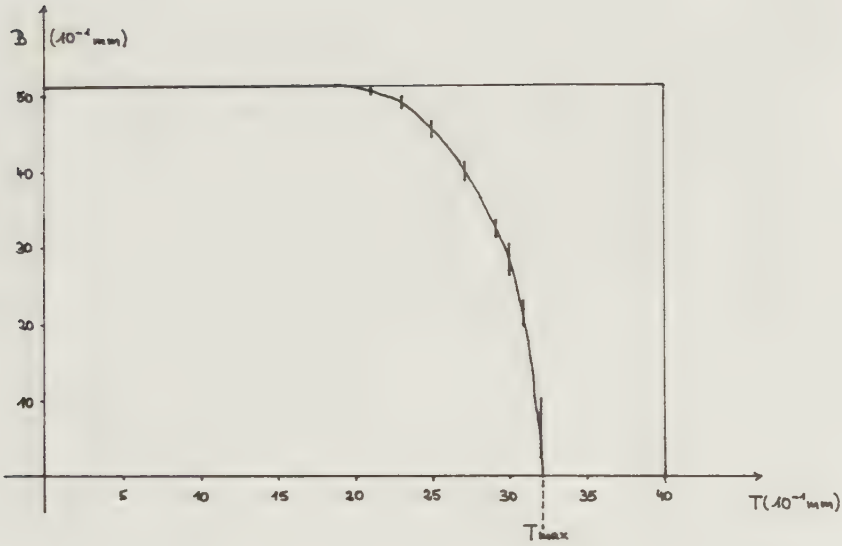
Graphik zur Auswertung No.21402



Auswertung No. 21502
Durafil[R] universal
5,1 mm Blendendurchmesser
ohne Schmelzdurchstrahlung

No. 10^{-1} mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	M	S
0	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
1	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
2	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
3	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
4	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
5	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
6	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
7	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
8	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
9	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
10	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
11	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
12	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
13	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
14	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
15	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
16	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
17	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
18	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
19	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
20	51	51	51	51	50,5	51	51	51	51	51	50,95	0,16
21	51	51	51	50,5	50	51	50,5	50,5	50,5	51	50,7	0,35
22	50,5	50,5	50	50	49	50,5	50	49,5	49,5	50,5	50	0,53
23	50	49,5	49	49	48	48,5	48	48	48	49	48,7	0,72
24	48,5	47,5	48	47,5	46	47	46	46,5	46,5	48	47,15	0,89
25	46,5	45	46,5	45	44	45	44	44,5	44,5	45,5	45,05	0,90
26	44,5	43,5	44	43	42	42,5	42	42,5	42	43,5	42,95	0,90
27	42	40	41,5	39,5	38,5	39,5	39	39,5	39	41,5	40	1,22
28	38	37	38	36,5	35	36,5	35,5	36	35,5	37	36,5	1,02
29	34	32,5	34	32,5	31	31,5	31	32	31	33	32,25	1,16
30	29	27	29	27,5	25	27	25	26,5	25	27	26,8	1,50
31	23	19	21,5	19,5	18	20	18	19	17	21	19,6	1,82
32	10	9	10	10	0	9	0	10	0	12	7	4,89
Tmax	32	32	32,5	32	31,5	32	31,5	32	31,5	32	31,9	0,32

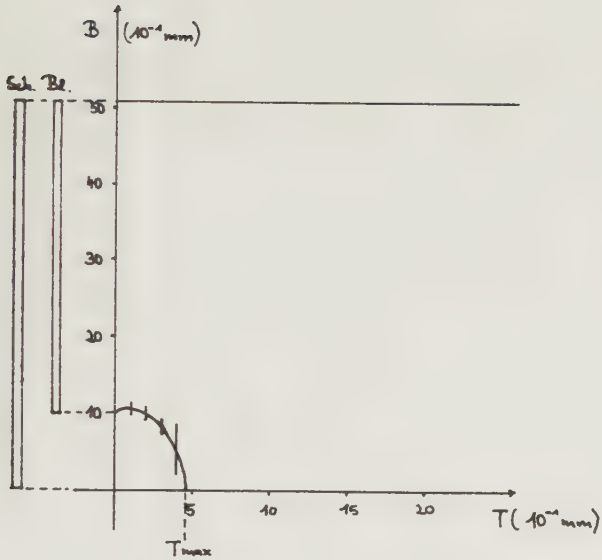
Graphik zur Auswertung No.21502



Auswertung No. 21112 n=10
Durafil^{R} universal
1 mm Blendendurchmesser
mit Schmelzdurchstrahlung

No. 10^{-1}mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	M	S
0	10	10	10,5	10	9,5	10	10	9,5	10	10,5	10	0,33
1	10,5	11	11,5	10	9	11	11,5	10	10,5	11	10,6	0,76
2	10,5	10,5	11	8,5	7,5	11	11	9	9,5	10	9,85	1,20
3	9	9	10,5	6,5	6	9,5	9	7	8	8,5	8,3	1,41
4	6,5	7,5	8	0	0	8	8	3	5	5	5,1	3,44
5	2	2,5	4	0	0	5	3	0	1	1	1,85	1,76
Tmax	5	5	5	3,5	3,5	5	5	4	5	5	4,6	0,65

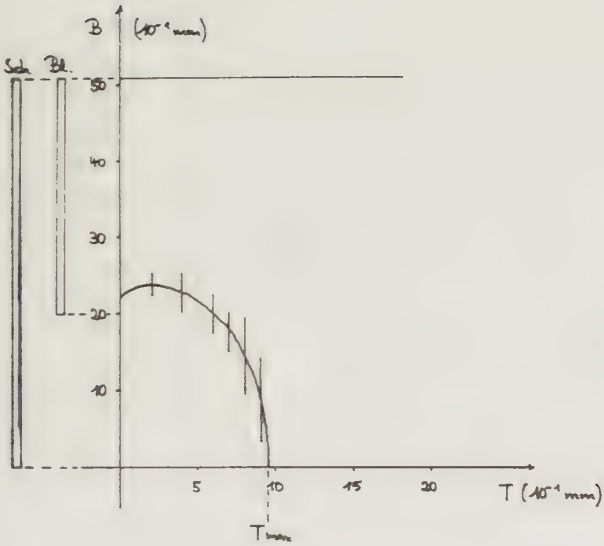
Graphik zur Auswertung No.21112



Auswertung No. 21212 n=10
Durafil[R] universal
2 mm Blendendurchmesser
mit Schmelzdurchstrahlung

No. 10^{-1}mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	M	S
0	21	23	23,5	23	23	23	22,5	22	21,5	20	22,15	1,09
1	22	25	25	23,5	24	24,5	23,5	24	22,5	20	23,4	1,54
2	22,5	25,5	25	24	24,5	24,5	24	24	23	20	23,7	1,57
3	22	25	25	24	24,5	24,5	23,5	24	22,5	19	23,4	1,89
4	21	24,5	24,5	23	24,5	24	23	24	21,5	18	22,8	2,09
5	19,5	23	23,5	22	23,5	23	22	23,5	20,5	16	21,65	2,40
6	18	21,5	21,5	20	22	22	21	22	19	13	20	2,79
7	14	20,5	20	18	20,5	20,5	18,5	20,5	16,5	10	17,9	3,52
8	9	18	17,5	15	18	17	16	18	12,5	2	14,3	5,21
9	0	12	12	8	14	11	12,5	14	5	0	8,85	5,96
10	0	4	4	0	7	4	3,5	7,5	0	0	3	2,90
Tmax	8,5	10	10	9,5	10	10	10	10	9	8	9,5	0,56

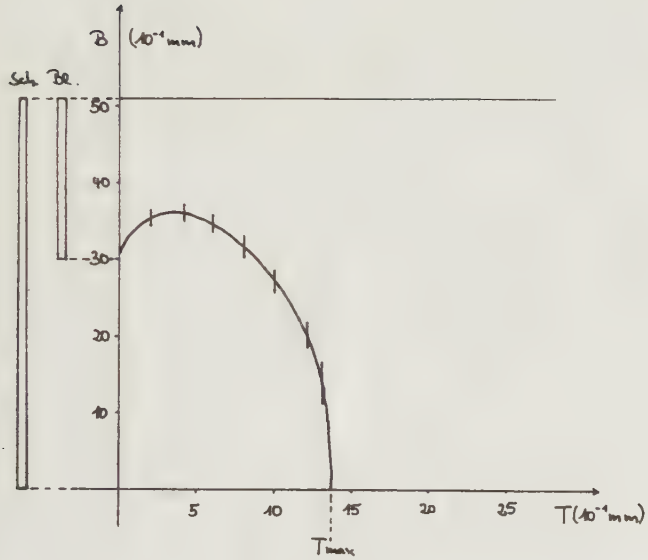
Graphik zur Auswertung No.21212



Auswertung No. 21312 n=10
Durafil^{R} universal
3 mm Blendendurchmesser
mit Schmelzdurchstrahlung

No. 10^{-1}mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	M	S
0	31	30,5	30,5	31	32	31,5	30	31,5	31	31	31	0,58
1	34	32,5	35	35,5	36	36	33	35	35,5	34,5	34,6	1,50
2	35	33,5	36	36,5	37,5	36	34,5	36	36	36	35,7	1,11
3	35	34	37	37	37,5	36	35	36,5	36,5	37	36,15	1,13
4	35	34	37	37	37,5	36	35	36,5	36,5	37	36,15	1,13
5	34,5	33,5	36,5	36,5	37	35,5	35	36	36	36,5	35,7	1,09
6	34	33	35,5	36	36,5	34	34	35	35,5	35	34,85	1,09
7	32	31,5	34,5	35	36	32,5	33	33,5	34,5	34	33,65	1,41
8	31	29,5	32	33	34	31	31,5	31,5	33	32,5	31,9	1,28
9	29	27	30	31	32	29,5	29,5	29,5	30	30,5	29,8	1,32
10	26,5	24	27	28,5	29,5	26,5	26,5	27	28	28	27,15	1,49
11	23,5	21	25	26	27	23,5	23,5	25	24,5	25,5	24,45	1,68
12	20	17	21,5	22	23	20,5	18,5	20,5	19,5	22	20,45	1,80
13	13,5	9	17	17	18	14	12	16	13	16	14,6	2,66
14	0	0	4	5	5	0	0	3	0	3	2,0	2,21
Tmax	13,5	13	14	14	14	13,5	13,5	14	13,5	14	13,7	0,26

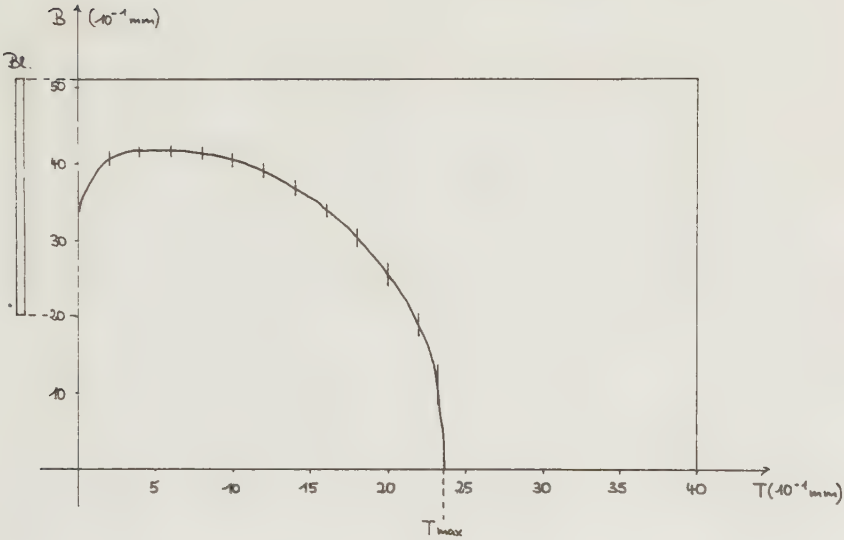
Graphik zur Auswertung No.21312



Auswertung No. 23202 n=10
Durafil^{R} braun
2 mm Blendendurchmesser
ohne Schmelzdurchstrahlung

No. 10^{-1}mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	M	S
0	32,5	35	32,5	35	34	34	32,5	32	34	35	33,65	1,31
1	36	40	37	39	38,5	39,5	38	37,5	39	39	38,35	1,22
2	39	41,5	39	41	39,5	41	41	39	41	41,5	40,35	1,09
3	39,5	42	40,5	41,5	40	41,5	42	40,5	41,5	42	41,1	0,91
4	40,5	42	41	42	40,5	42	42,5	40,5	41,5	42	41,45	0,75
5	40,5	42	41	42	41	42	42,5	41	42	42	41,6	0,65
6	40,5	42	41	42	41	42	42,5	41	41,5	42	41,55	0,64
7	40,5	42	41	42	41	41,5	42,5	40,5	41,5	42	41,45	0,68
8	40,5	41,5	41	41,5	40,5	41,5	42,5	40,5	41	42	41,25	0,67
9	40	41	40,5	41	40	41	42,5	40	40,5	41,5	40,8	0,78
10	39,5	40,5	39,5	40,5	39,5	40,5	42	39,5	40	41	40,25	0,82
11	39	40	38,5	39,5	38,5	39,5	41	39	39,5	40,5	39,5	0,81
12	38	39	38	39	37,5	38,5	40	38,5	38,5	40	38,7	0,82
13	37	38	37	37,5	36,5	37,5	39	37,5	37,5	39	37,65	0,82
14	36	37	36	36	35,5	36,5	38	36,5	36,5	38	36,6	0,84
15	34,5	35,5	34,5	35	34	35,5	37	35	35	37	35,3	1,00
16	33	34	33	33,5	32,5	34	36	34	34	35,5	33,95	1,09
17	31	32,5	31,5	32,5	30,5	32,5	34,5	32	32	34	32,3	1,22
18	29	30,5	29	30	29	30,5	33	30	30	32	30,35	1,31
19	27	28	27	27,5	26,5	28,5	30,5	28	28	29,5	28,05	1,21
20	24	25	24	25	23,5	26	27,5	25,5	25,5	26,5	25,25	1,22
21	21,5	22,5	20	22	20,5	21	23	22	22,5	21	21,6	0,97
22	19	19	15,5	19	17	19	20	19	18	18,5	18,4	1,29
23	11,5	13	7	11	9	12	14	12	12	9	11,05	2,12
24	4	8	0	0	0	0	6	0	0	0	1,8	3,14
Tmax	24	24	23	23,5	23,5	23,5	24	23,5	23,5	23	23,55	0,37

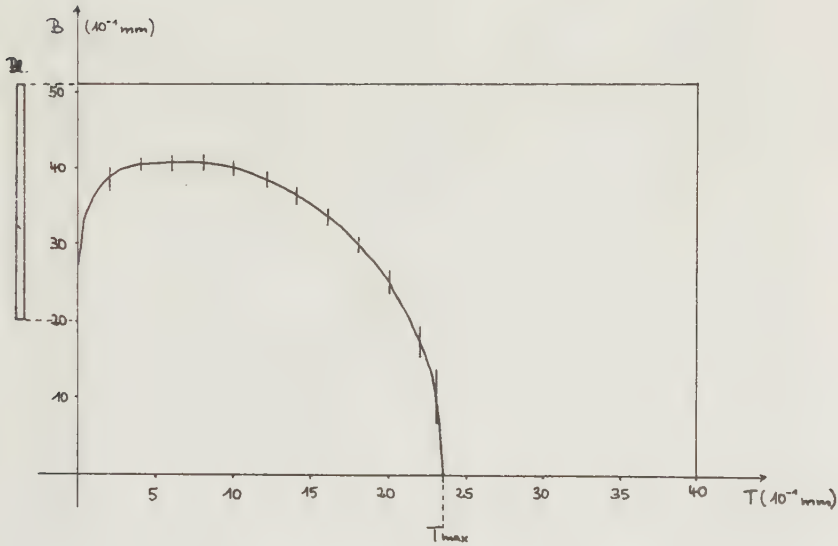
Graphik zur Auswertung No.23202



Auswertung No. 24202 n=10
Durafil^{R} grau
2 mm Blendendurchmesser
ohne Schmelzdurchstrahlung

No. 10^{-1}mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	M	S
0	26	26	27	29,5	28	27	28	27	27	27	27,25	1,03
1	35	32	36	37	37	37	37	37	35	35	35,8	1,62
2	38,5	36	38,5	40	40,5	40	40	39	38	38,5	38,9	1,32
3	39,5	37	39,5	41	41,5	41	41	40	39	39	39,85	1,35
4	40	38	40	41,5	42	41,5	41,5	40,5	39,5	40	40,45	1,21
5	40,5	38,5	40	41,5	42	41,5	41,5	41	40	40	40,65	1,05
6	40,5	38,5	40	41,5	42	41,5	42	41	40	40	40,7	1,11
7	40,5	38,5	40	41,5	42	41,5	41,5	40,5	40	40	40,6	1,04
8	40,5	38,5	40	41,5	42	41,5	41,5	40,5	40	40	40,6	1,04
9	40	38	39,5	41	41,5	41	41,5	40	39,5	39,5	40,15	1,11
10	40	38	39	40,5	41	40,5	41	39,5	39	39	39,75	1,01
11	39	37,5	38,5	40	40,5	40	40,5	39,5	38,5	38,5	39,25	1,01
12	38	37	37,5	39	40	39	40	38,5	38	38	38,5	1,00
13	37	36	36,5	38	39	38	39	37,5	37	37	37,5	1,00
14	36	35	35,5	37	38	37	38	36,5	35,5	36	36,45	1,04
15	35	34	34,5	36	37	36	36,5	35	34,5	34,5	35,3	1,00
16	33,5	32,5	33	34,5	35,5	34,5	35	33	33	33	33,75	1,03
17	31,5	31	31,5	32,5	33,5	32,5	33,5	31,5	31	31,5	32	0,94
18	29,5	29	29,5	30,5	32	30,5	31,5	29,5	29	29,5	30,05	1,04
19	26,5	27	27	28	30	28	29	27	27	27	27,65	1,11
20	23,5	24,5	24	26	28	25	26,5	24	24,5	24	25	1,41
21	20	21,5	21	22,5	25,5	21,5	23	20,5	21	21	21,75	1,58
22	15	17	16	18,5	21,5	16,5	18,5	15,5	17	17	17,25	1,88
23	6	8	8	14	16	9	14	8	8	8	9,9	3,41
24	0	0	0	3	6	0	4	0	0	0	1,3	2,21
Tmax	23	23,5	23,5	24	24,5	23,5	24	23,5	23,5	23,5	23,65	0,41

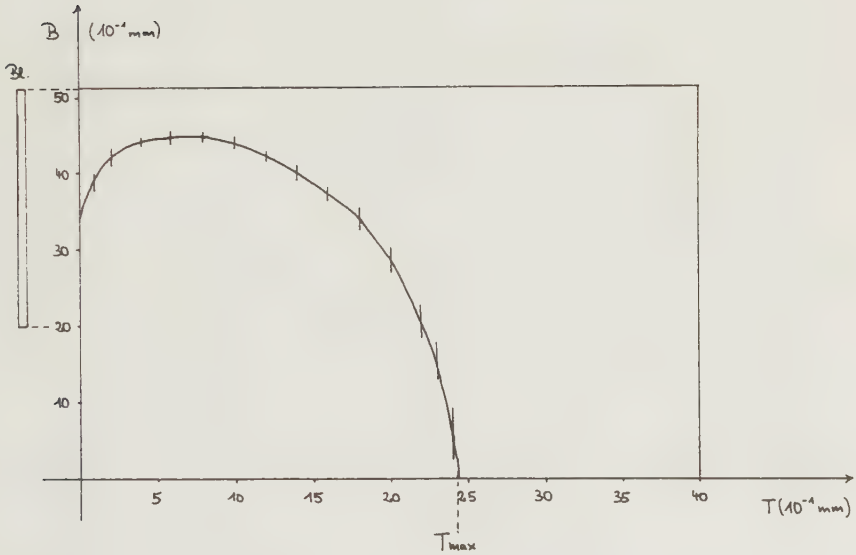
Graphik zur Auswertung No.24202



Auswertung No. 25202 n=9
Durafil[R] universal - opak
2 mm Blendendurchmesser
ohne Schmelzdurchstrahlung

No. / 10^{-1} mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	M	S
0	34	33	35	35	34	34	34	34	34	34,22	0,61
1	41,5	41,5	40	38	40	38	38	39,5	38	39,39	1,47
2	45	44	42	40	44	42	42	42,5	41	42,5	1,58
3	45,5	45	43	41	44,5	44	43,5	44	43	43,72	1,32
4	45,5	45,5	44	42	45,5	44,5	44,5	44,5	44	44,44	1,10
5	45,5	45,5	45	43,5	45,5	45	44,5	44,5	44,5	44,83	0,65
6	45,5	45,5	45	43,5	45,5	45	44,5	44,5	44,5	44,83	0,65
7	45,5	45,5	45	43,5	45,5	45	44,5	44,5	44,5	44,83	0,65
8	45	45	45	43,5	45,5	45	44,5	44,5	44,5	44,72	0,56
9	44,5	44,5	45	43	45,5	44,5	44	44	44	44,33	0,70
10	44	44	44,5	42,5	45	44	43,5	43,5	43	43,78	0,75
11	43,5	43	44	41,5	44,5	43,5	43	42,5	42	43,06	0,95
12	42,5	42,5	43,5	40	44	42,5	42	41,5	41	42,16	1,21
13	41,5	41,5	42,5	39	42,5	41,5	40,5	40,5	40	41,06	1,16
14	40	40,5	41,5	38	41	40,5	39	39,5	39	39,94	1,11
15	39	39,5	40	37	40	39,5	37,5	38	38	38,72	1,12
16	38	38,5	38,5	36	38,5	37,5	36,5	36	36,5	37,33	1,09
17	37	37	36,5	35	37	35,5	35	34	34	35,66	1,25
18	35	35,5	34,5	33	35	33,5	33	32,5	32	33,88	1,26
19	32,5	33	32	31	32,5	31,5	31	29,5	29,5	31,39	1,27
20	30	30	29	28	30	28,5	28,5	26,5	26,5	28,55	1,38
21	27,5	27	26	25	26	25,5	24,5	24,5	23	25,44	1,38
22	24	22,5	21	20,5	22	21,5	19	19,5	20	21,11	1,58
23	19	19	15,5	15	17,5	16,5	11,5	15,5	11	15,61	2,87
24	10	10	7	6	8	7	0	5	0	5,88	3,71
25	5	3	0	0	0	0	0	0	0	0,89	1,83
Tmax	25	25	24	24	24,5	24	23,5	24	23,5	24,17	0,56

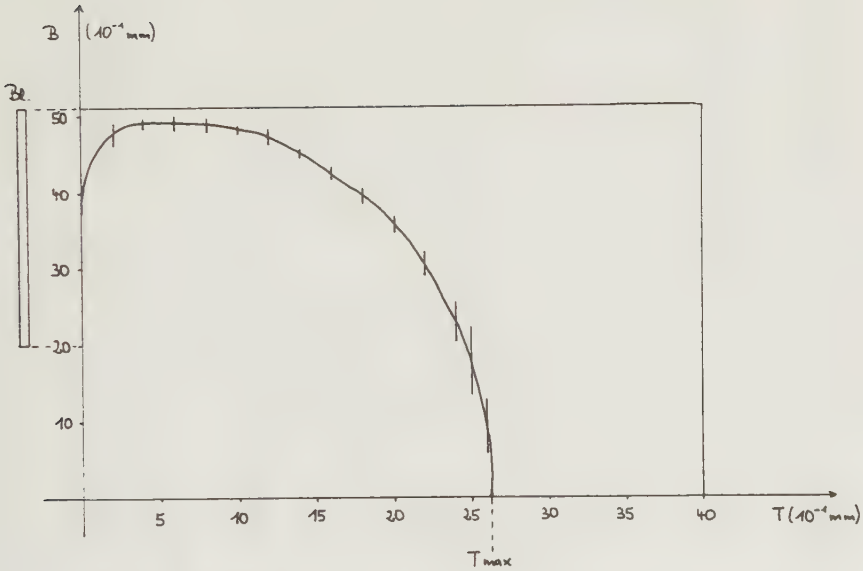
Graphik zur Auswertung No.25202



Auswertung No. 26202 n=9
Durafil^{R} braun - opak
2 mm Blendendurchmesser
ohne Schmelzdurchstrahlung

No. 10^{-1}mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	M	S
0	35	35	35	39	39	35	38	40	38	37,11	2,08
1	44	42,5	42,5	46	46	42	45,5	47,5	46	44,66	1,97
2	47,5	45,5	45	48,5	49,5	46	49	49	49	47,66	1,72
3	48,5	47,5	46,5	50	50	47	50	50	50	48,83	1,47
4	49	48,5	46,5	50	50	48	50	50	50	49,11	1,24
5	49	48,5	46,5	50	50	48,5	50	50	50	49,16	1,19
6	49	48,5	46,5	50	50	48,5	50	50	50	49,16	1,19
7	49	48,5	46,5	50	49,5	48,5	50	50	50	49,11	1,17
8	48,5	48	46,5	50	49,5	48,5	50	50	50	49	1,21
9	48,5	48	46,5	49,5	49	48	50	50	50	48,72	1,09
10	48	47,5	47	49	49	47,5	49,5	49	49	48,38	0,89
11	47	47	46	48,5	48,5	47	49	48,5	48,5	47,77	1,04
12	46	46,5	45,5	48	48	46,5	48	48	48	47,16	1,03
13	44,5	45,5	44,5	47	47	46	47	47,5	47	46,22	1,14
14	43,5	44,5	43,5	46,5	46,5	45	46	46,5	45,5	45,27	1,23
15	42,5	43,5	42,5	45	45	43,5	45	45,5	44,5	44,11	1,13
16	41,5	42	41,5	43,5	43,5	42	43	44,5	43	42,72	1,03
17	40	41	40	42,5	42,5	40	42	43	42	41,44	1,21
18	38,5	39	38,5	41	40,5	38,5	41	41,5	40,5	39,88	1,24
19	37	37	37	39,5	38,5	36,5	39	40	38,5	38,11	1,27
20	34,5	35	34,5	37	36	33,5	36,5	38	36,5	35,72	1,41
21	32	32	33	34,5	33	31,5	34,5	36,5	34	33,44	1,59
22	29,5	29	29,5	31,5	30	27,5	32	32,5	30,5	30,22	1,58
23	26	25,5	26,5	29,5	27,5	24,5	28	30	27	27,16	1,80
24	22	21	22,5	25	23,5	18	23	26,5	24	22,83	2,44
25	15,5	15	16,5	19	15	10	19	22	18	16,66	4,13
26	8	7	10	13	10	0	9	15	10	9,11	4,20
27	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0,89	2,66
Tmax	26	26	26	26,5	26,5	25,5	26	27	26,5	26,22	0,43

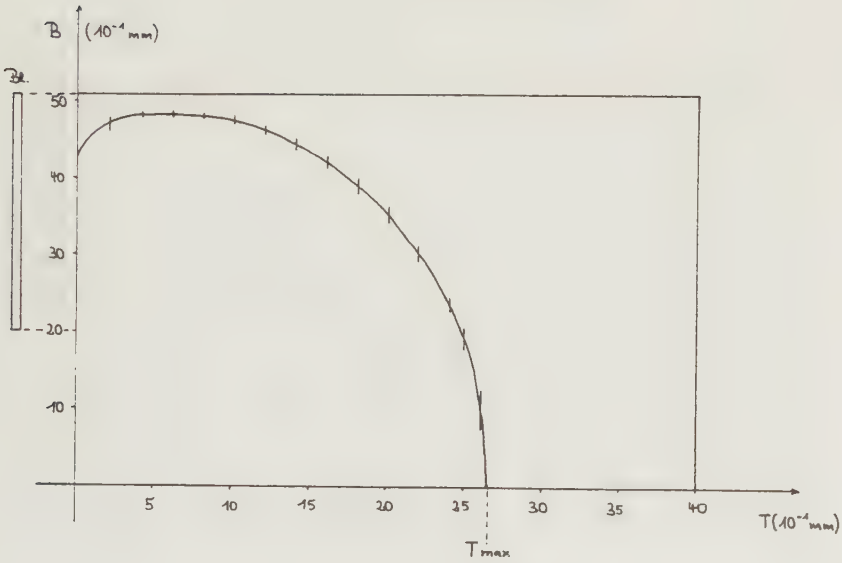
Graphik zur Auswertung No.26202



Auswertung No. 27202 n=10
Durafil^{R} grau - opak
2 mm Blendendurchmesser
ohne Schmelzdurchstrahlung

No. 10^{-1}mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	M	S
0	44,5	42	42	43	43,5	44,5	43,5	43,5	43,5	42,5	43,25	0,88
1	47	44	45	47	45,5	47,5	45,5	45	45,5	45	45,7	1,11
2	48	46,5	47	47,5	47,5	48,5	47,5	47,5	47,5	46	47,35	0,70
3	49	47,5	47,5	48	48	49	48	48	48	46,5	47,75	0,75
4	49	48,5	48,5	48	48,5	49,5	48	48,5	48,5	47	48,4	0,65
5	49	48,5	48,5	48	48,5	49,5	48	48,5	48,5	47	48,4	0,65
6	49	48,5	48,5	48	48,5	49,5	48	48,5	48,5	47	48,4	0,65
7	49	48,5	48,5	48	48	49,5	48	48,5	48,5	47	48,35	0,66
8	49	48,5	48,5	48	48	49,5	47,5	48,5	48,5	47	48,3	0,71
9	48,5	48	48	48	47,5	49	47,5	48	48,5	47	48	0,58
10	48	47,5	47,5	47,5	47,5	49	47	48	48	46,5	47,65	0,66
11	47,5	47	46,5	47	46,5	48,5	46	47	47	45	46,8	0,91
12	47,5	46,5	45,5	46,5	46	47,5	45,5	46,5	46,5	44,5	46,25	0,91
13	46,5	45,5	45	45,5	45,5	46,5	44,5	46	46	44	45,5	0,81
14	45,5	44,5	44	45	44,5	45,5	44	45	45	43	44,6	0,77
15	44,5	43,5	43	44	43	44,5	42,5	43,5	43	42	43,25	0,82
16	43,5	42,5	41,5	43	42	43	41,5	42,5	42	41	42,25	0,79
17	42	41	40,5	42	41	41,5	40	40,5	41	39,5	40,8	0,81
18	40,5	39	38	40	39,5	39,5	38,5	39	39,5	37,5	39,1	0,91
19	39	37	37	38,5	37,5	37,5	36,5	37,5	37	36	37,45	0,92
20	36,5	35	34,5	37	35	35,5	35	35	35,5	33,5	35,25	0,98
21	34,5	33	32,5	34,5	33	33	32,5	32	32,5	31,5	32,9	0,97
22	31,5	30,5	29,5	32	29,5	30,5	30	29	30	29	30,15	1,00
23	30	27,5	26	28	26,5	27	27,5	26	27	25	27,05	1,37
24	25	24,5	22	24	23	24	23,5	22	23	22	23,3	1,09
25	21	19	16	17,5	18,5	18,5	18	17	18,5	16	18	1,48
26	14	13,5	10	8	11	10	10	7	11	8	10,25	2,27
27	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,8	2,53
Tmax	27	26,5	26,5	26,5	26	26,5	26,5	26	26	26	26,35	0,33

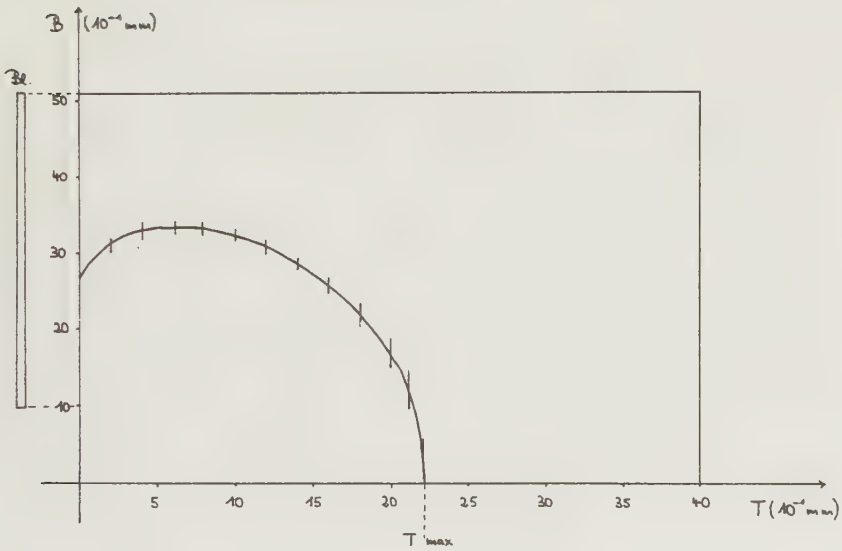
Graphik zur Auswertung No.27202



Auswertung No. 31102 n=10
Fotofil[R] universal
1 mm Blendendurchmesser
ohne Schmelzdurchstrahlung

No. 10^{-1}mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	M	S
0	27,5	26,5	25	26,5	25	26	27,5	27,5	26	26	26,35	0,95
1	29,5	28	29	28,5	28,5	29	30,5	30,5	28,5	28	29,1	0,92
2	31	31	31,5	30	30,5	31,5	32,5	33	30	30,5	31,15	1,00
3	32	32	32	31	31,5	32,5	33,5	34	32	32	32,25	0,88
4	33,5	32	32,5	31,5	32	32,5	33,5	34	32,5	33,5	32,75	0,82
5	34	32,5	33	31,5	32,5	33	34	34	32,5	33,5	33,05	0,83
6	34	33	33	31,5	33	33	34	34	33	34	33,25	0,79
7	34	33	33	31,5	33	33	34	34	33,5	34	33,3	0,79
8	33,5	33	32,5	31,5	33	33	33,5	34	33,5	34	33,15	0,83
9	33	32,5	32,5	31	33	33	33,5	33,5	33	33,5	32,85	0,74
10	32,5	32	32	30	32,5	32,5	33	33	32,5	33	32,3	0,88
11	32	31,5	31,5	29,5	32	31,5	32	32,5	32	32,5	31,7	0,85
12	31,5	30,5	30,5	29	31,5	30,5	31	32	31,5	31,5	30,95	0,86
13	30,5	29,5	29,5	28,5	30,5	29,5	30	31	30,5	30,5	30,1	0,73
14	29,5	28,5	28	27,5	29	28,5	28,5	30	29	29,5	28,8	0,75
15	28,5	27,5	26,5	26	27,5	27	27	29	27,5	28,5	27,5	0,94
16	27	26,5	25	24,5	25,5	25,5	25,5	27,5	26	27	26	0,97
17	25,5	25	22,5	23	23,5	23,5	24	26	24	25,5	24,25	1,18
18	24	23	20,5	21	21,5	21	21,5	24	21,5	23,5	22,15	1,32
19	22	20	18	19	18,5	18,5	19	22	20	21	19,8	1,45
20	18,5	17	13	16,5	15,5	15	15,5	20	17	17,5	16,55	1,95
21	11	12	7	12,5	11	9	12	15,5	12	13	11,5	2,29
22	3	4	0	4	4	3	4	8	4	4	3,8	1,93
Tmax	22	22	21,5	22,5	22	22	22	22,5	22	22	22,05	0,28

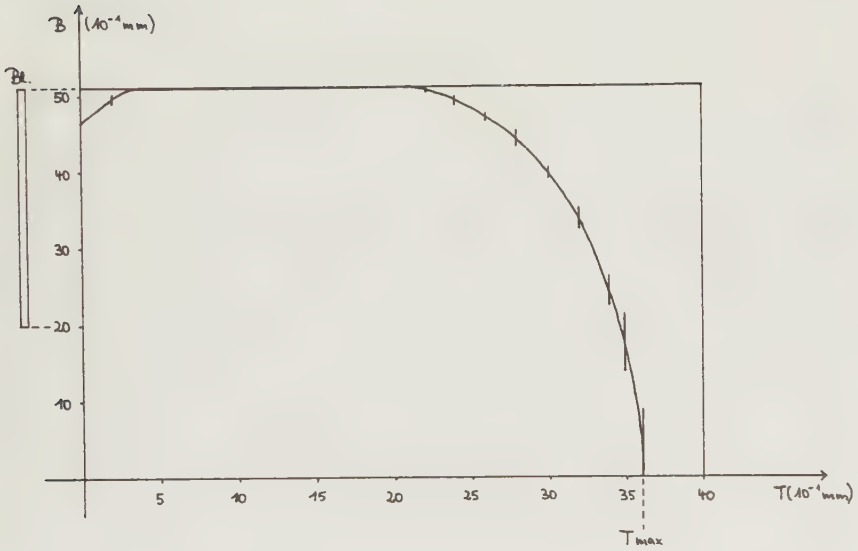
Graphik zur Auswertung No.31102



Auswertung No. 31201 n=9
FotofilR universal
2 mm Blendendurchmesser
ohne Schmelzdurchstrahlung

No. 10^{-1} mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	M	S
0	44	45	48	48	48	47	47	46	46	46,56	1,42
1	48	49	51	50	49,5	50	49,5	49	50	49,56	0,85
2	50	50,5	51	50,5	51	51	50	50	51	50,56	0,47
3	50,5	51	51	51	51	51	51	51	51	50,94	0,17
4	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
.											
.											
.											
18	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
19	51	51	51	51	50,5	51	51	51	51	50,94	0,17
20	51	51	51	51	50,5	51	51	51	51	50,94	0,17
21	51	51	50,5	51	50,5	50,5	50,5	50,5	51	50,72	0,27
22	50,5	51	50,5	50,5	50,5	50,5	50	50,5	50,5	50,5	0,25
23	50	51	49,5	50	50	49,5	49,5	50,5	50	50	0,56
24	49,5	51	48,5	49,5	49,5	48,5	48,5	50	49,5	49,39	0,81
25	48,5	50,5	47,5	48,5	48,5	47	47,5	49	48,5	48,39	1,04
26	47,5	49	46,5	47,5	47,5	46	46,5	47,5	47	47,22	0,87
27	46	48	45,5	46,5	46	44	45,5	46	45,5	45,88	1,05
28	44	46	44	44,5	44,5	41,5	44	44,5	44	44,11	1,17
29	42	44	42	42,5	42,5	39,5	42	43	42	42,16	1,20
30	39	41	39,5	40	40	37	40	41	40	39,72	1,20
31	35	39	37	37,5	37	34,5	37	38	37,5	36,94	1,40
32	31	35	33,5	34,5	34	31	34	34,5	34	33,5	1,47
33	27	32	30,5	30,5	30	27	30,5	30,5	29,5	29,72	1,68
34	21,5	29	25,5	26	25	22	25,5	24,5	23,5	24,72	2,25
35	10	22	18	20	17	13	18	17	14	16,55	3,85
36	0	11	6	9	5	0	8	6	0	5	4,16
Tmax	35	36,5	36,5	36,5	36	35,5	36,5	36	35,5	36	0,56

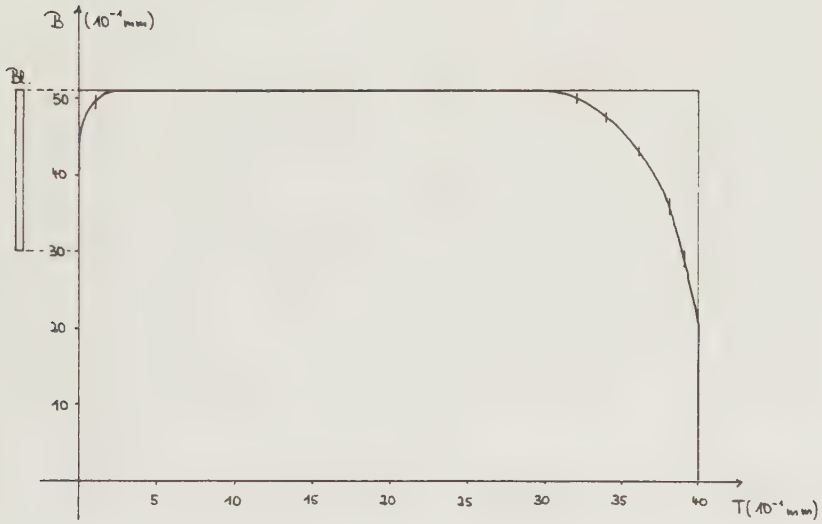
Graphik zur Auswertung No.31202



Auswertung No. 31302 n=10
Fotofil^{R} universal
3 mm Blendendurchmesser
ohne Schmelzdurchstrahlung

No. 10^{-1} mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	M	S
0	41	40	41	42	42	42	43	42	42	43	41,8	0,91
1	50	48	50	49,5	49,5	50	50	50	49,5	50	49,7	0,63
2	51	50	50,5	50,5	50,5	51	51	51	50,5	51	50,75	0,35
3	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
.												
.												
.												
30	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
31	50,5	50	50,5	51	51	51	51	51	51	50,5	50,75	0,36
32	49,5	49	49,5	50,5	50,5	50,5	50,5	50	50	49,5	49,95	0,55
33	48	48	48,5	49,5	49,5	50	49,5	48,5	48,5	48,5	48,85	0,71
34	46,5	47	47	48,5	48	48,5	48	47,5	47	47,5	47,55	0,69
35	44,5	45,5	45	46	45,5	46	46	46	45,5	45,5	45,55	0,50
36	42,5	43	42,5	44	43,5	44	44	44	44	44	43,55	0,64
37	40	40	39	41,5	40,5	41	41	41	40,5	40,5	40,5	0,71
38	36,5	36	34	38	36	37	37	37	37,5	36,5	36,55	1,09
39	28	28,5	27	30	29,5	28,5	29	28,5	30	29	28,8	0,85
40	20	19	17,5	20	19	18	18	17,5	20,5	19,5	18,9	1,10
Tmax	(40)	(40)	(40)	(40)	(40)	(40)	(40)	(40)	(40)	(40)	(40)	(0)

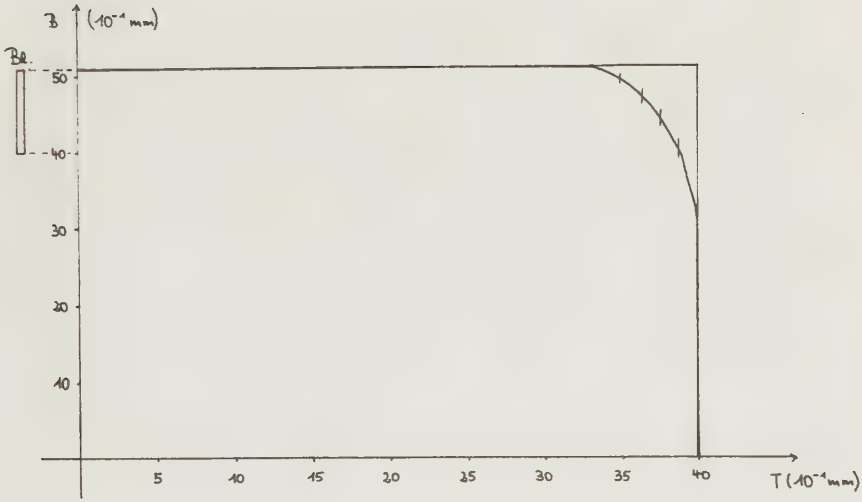
Graphik zur Auswertung No.31302



Auswertung No. 31402
Fotofil^{R} universal
4 mm Blendendurchmesser
ohne Schmelzdurchstrahlung

No. 10^{-1}mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	M	S
0	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
.												
.												
.												
31	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
32	51	51	51	50,5	51	51	51	51	51	51	50,95	0,16
33	51	50,5	51	50	50,5	51	51	50,5	50,5	51	50,7	0,35
34	51	50,5	51	49	49,5	50,5	50,5	50	50	50,5	50,25	0,63
35	50,5	49,5	50,5	48	48,5	49,5	49,5	49	49	49,5	49,05	0,84
36	50	48	50	46,5	46,5	48	48,5	48	47,5	48	48,1	1,19
37	48	46	47,5	44,5	44,5	45	47	46	45	46	45,95	1,23
38	45	43,5	45	42	41	42,5	45	43	42,5	43,5	43,3	1,37
39	40	38	40,5	38	37	39	40	38,5	37,5	39	38,75	1,16
40	27	25	30	28	27	30	30	28	30	30	28,5	1,77
Tmax	(40)	(40)	(40)	(40)	(40)	(40)	(40)	(40)	(40)	(40)	(40)	(0)

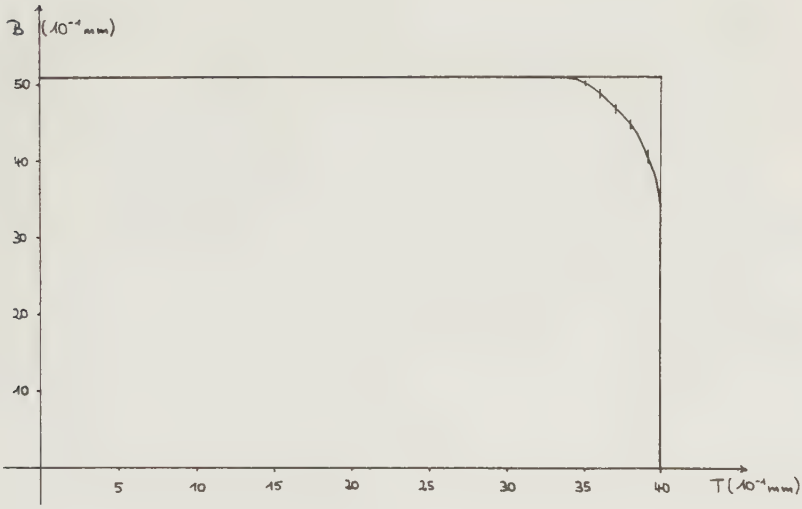
Graphik zur Auswertung No.31402



Auswertung No. 31502 n=10
Fotofil^{R} universal
5,1 mm Blendendurchmesser
ohne Schmelzdurchstrahlung

No. / 10^{-1} mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	M	S
0	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
.												
.												
.												
33	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	0
34	51	51	51	51	51	51	51	50,5	51	50,5	50,9	0,21
35	50	50	50	50	50,5	50,5	50	50	50	50	50,1	0,21
36	48	49	48,5	48,5	49,5	49,5	49	49,5	49	48,5	48,75	0,42
37	46,5	47	47,5	47	47	48,5	47	46,5	47	46,5	47,05	0,60
38	45,5	45	45,5	45	44,5	46	44,5	45	45	44	45	0,58
39	41,5	40	42	41	40	42	41	41,5	40	40	40,9	0,4
40	34	32	34	32	31	33	34	33	31	32	32,6	1,17
Tmax	(40)	(40)	(40)	(40)	(40)	(40)	(40)	(40)	(40)	(40)	(40)	(0)

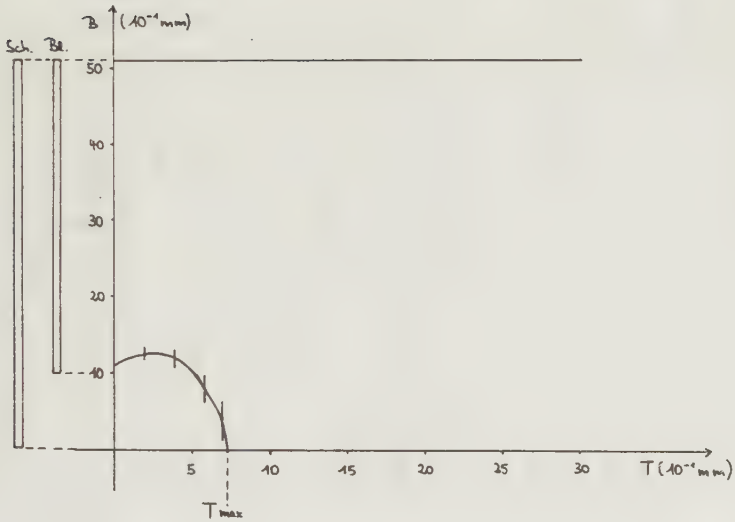
Graphik zur Auswertung No.31502



Auswertung No. 31112 n=10
Fotofil^{R} universal
1 mm Blendendurchmesser
mit Schmelzdurchstrahlung

No. 10^{-1} mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	M	S
0	10	11	11	10	12	12	10	10	10	11	10,7	0,82
1	11	13	12	11	13	12,5	11,5	11	10,5	12	11,75	0,88
2	11,5	13,5	12,5	11,5	13,5	13	12	12	11	12,5	12,3	0,85
3	11,5	14	12,5	11,5	14	13	12	12	11	12,5	12,5	1,02
4	10,5	14	11,5	11	14	13	11,5	11,5	10,5	12	11,95	1,30
5	9,5	13	9,5	10	13	12	10,5	10	8,5	10	10,6	1,53
6	7	11	7	8,5	12	10	8,5	7,5	4	7,5	8,3	2,23
7	3	6	3	3,5	9	7	4	3,5	0	4	4,3	2,48
8	0	3	0	0	5	4	0	0	0	0	1,2	1,99
Tmax	7	8	7	7	8,5	8,5	7	7	6	7	7,3	0,79

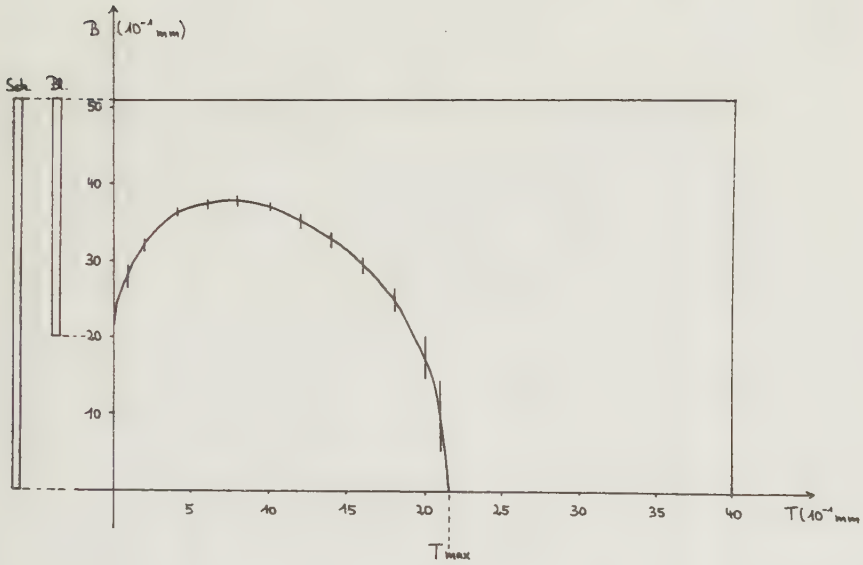
Graphik zur Auswertung No.31112



Auswertung No. 31212 n=9
Fotofil^{R} universal
2 mm Blendendurchmesser
mit Schmelzdurchstrahlung

No. 10^{-1}mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	M	S
0	23	22	21	22	20,5	21	21	22	21	21,5	0,79
1	30	29	25	30	25	28	28,5	28,5	28,	528,05	1,87
2	34	33,5	30	34	30	32	33	32	32	32,28	1,52
3	36,5	35	32,5	36	32,5	34,5	35,5	34	34,5	34,56	1,40
4	37,5	37	34	37	34,5	36	36,5	36	36,5	36,11	1,17
5	38	37	36	38	35,5	36,5	38	37	37,5	37,06	0,91
6	38,5	37,5	36,5	38	36	37	38,5	38	38	37,56	0,88
7	38,5	37,5	36,5	38	36	37,5	38,5	38,5	38,5	37,72	0,94
8	38,5	37,5	36,5	38	36	37,5	38,5	38	38,5	37,67	0,90
9	38	37	36	38	35,5	37	38,5	38	38	37,33	1,03
10	37,5	37	36	37,5	35	36	38	37,5	38	36,94	1,04
11	36,5	36,5	35	36,5	34,5	35	37,5	36,5	37	36,11	1,03
12	35,5	35,5	34	35,5	33,5	34	36,5	35,5	36	35,11	1,03
13	34,5	34,5	33	34,5	32,5	33	35,5	34,5	35	34,11	1,03
14	33,5	33,5	34	33	31	32	34,5	33,5	33,5	32,94	1,07
15	32	32	30,5	31,5	29,5	30,5	33	32,5	31,5	31,44	1,10
16	30,5	30,5	28,5	30	28	28,5	31	31	29,5	29,72	1,22
17	28,5	28,5	26	28	25,5	26,5	28,5	28,5	27,5	27,5	1,20
18	26	25,5	23	26	21,5	24	26	25,5	25	24,72	1,58
19	22,5	21	20	23	17	20	23	23	22	21,28	2,02
20	18,5	17	15	20	11	15	20	19,5	18	17,11	2,97
21	9	9,5	6,5	16	2	6,5	15	14	13	10,17	4,69
22	0	0	0	6	0	0	4	3	1	1,56	2,24
Tmax	21,5	21,5	21,5	22,5	21	21,5	22	22	22	21,72	0,45

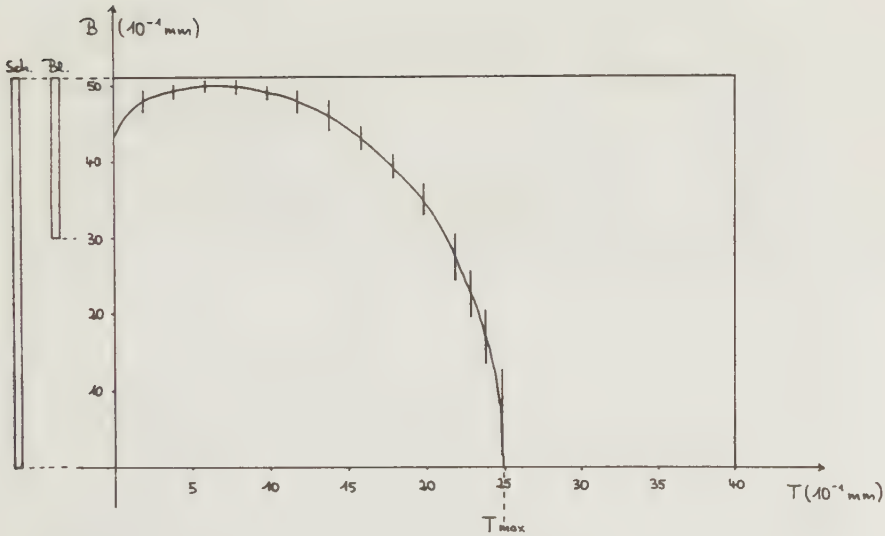
Graphik zur Auswertung No.31212



Auswertung No. 31312 n=10
Fotofil^{R} universal
3 mm Blendendurchmesser
mit Schmelzdurchstrahlung

No. 10^{-1}mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	M	S
0	45	42	44	43	42	45	41,5	41	40	44	42,75	1,71
1	48	44	47,5	46	47	48	43	44	43	47	45,75	2,04
2	50	46	50	47	50	50	46	47	46,5	50	48,25	1,88
3	50	47	50	49	50,5	50	47	47,5	47,5	50	48,85	1,43
4	50	48	50,5	50	50,5	50	48	48	48	50	49,3	1,14
5	50,5	48,5	50,5	50	50	50,5	49	48,5	48,5	50,5	49,65	0,92
6	50,5	48,5	50,5	50,5	50	50,5	50	48,5	48,5	50,5	49,8	0,92
7	50,5	48,5	50,5	50,5	50	50,5	50	48	48,5	50,5	49,75	1,01
8	50,5	48	50	50,5	50	50	50	48	48	50,5	49,55	1,10
9	50	47,5	50	50,5	50	50	50	47,5	48	50	49,35	1,18
10	50	47	50	50,5	50	50	49,5	47	47,5	49,5	49,1	1,37
11	49,5	46	50	50	49,5	49,5	49	46,5	47	49	48,5	1,51
12	49	45	49,5	49,5	49	49	48,5	46	46	48,5	48	1,66
13	48	44	48,5	49	48	48	48	45	45	48	47,15	1,76
14	47	42,5	47	48	47	47	47	43,5	44	47	46	2,04
15	46	41	45,5	47	46	45,5	45,5	42	42,5	46	44,7	2,06
16	44,5	39	44,5	44,5	44,5	44,5	44	40,5	41	44,5	43,25	2,21
17	43	37	43	44	42,5	43	42,5	39	39,5	42,5	41,6	2,27
18	40,5	35	40,5	42	40,5	41,5	40,5	37	38	40	39,55	2,19
19	38,5	32	38,5	39	38	39,5	38,5	35	36	37,5	37,25	2,30
20	35,5	29	36	36	35,5	37,5	34	33	34	34	34,65	2,36
21	32,5	25	33	33	32	34,5	33	29	30	31	31,3	2,74
22	29	21	30	28,5	28	31	29,5	24,5	26	27	27,45	2,97
23	24	17	25	23,5	24	28	25	20	21	22	22,95	3,07
24	18	11	18,5	17	18	24	18	12,5	15	17	16,9	3,56
25	8	0	9,5	7,5	9	17	9	0	3	5	6,8	5,09
26	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0,5	1,51
Tmax	25	24	25,5	25	25,5	26	25	24,5	25	25	25,05	0,55

Graphik zur Auswertung No.31312



4.5 Theoretische Betrachtung zu den Versuchsergebnissen und Diskussion derselben

Als bestimmende Faktoren der räumlichen Ausdehnung der erhärteten Anteile aller untersuchten weißlichthärtenden Composite-Materialien bezüglich der im vorigen Abschnitt dargestellten Versuchsergebnisse sind zu nennen:

a) Die Intensitätsverteilung des für die Polymerisation des Materials wirksamen Strahlungs- bzw. Lichtanteils. (Mit dem Ausdruck "Intensitätsverteilung" sei die räumliche Verteilung und die Stärke des Strahlungsflusses des Lichts wirksamer Wellenlänge im Composite-Material gemeint. Die genauen Definitionen der Begriffe "Strahlungsfluß", "Strahlungsflußdichte" und "Bestrahlungsstärke", die im folgenden Text benutzt werden, entnehme man Lehrbüchern der Physik.[22])

b) Die Dauer der Strahlungseinwirkung

c) Die Licht- bzw. Strahlungsempfindlichkeit des im Composite-Material enthaltenen Katalysatorsystems

Die unter a) genannte Intensitätsverteilung ist vielen Einzelfaktoren unterworfen, die jeder für sich das Resultat mitbestimmen. Diese einzelnen Parameter werden im folgenden genannt und diskutiert, sofern sie durch das aktive Handeln des Zahnarztes beeinflußbar sind. Ebenfalls soll der Einfluß der Bestrahlungszeit erörtert werden.
Die unter c) erwähnte Empfindlichkeit des Katalysatorsystems wird in ihren Auswirkungen nicht weiter untersucht, da diese vom Zahnarzt nicht beeinflußbar ist.
Die räumliche Intensitätsverteilung des Lichts im Füllungsmaterial hängt von folgenden Parametern ab:

1. Der Intensität und Verteilung des wirksamen Strahlungsanteils an der Austrittsöffnung des Lichtleiters, beruhend auf

- der Bauweise, der im Belichtungsgerät verwendeten Lampe
- den optischen Eigenschaften des im Gerät vorhandenen Filters
- den optischen Eigenschaften des Lichtleiters
- der sinnvollen räumlichen Zuordnung der eben genannten Bauteile
- der Größe der Austrittsöffnung des Lichtleiters

2. Der durch den Versuchsaufbau vorgegebenen Lichtverteilung und Beeinflussung der Lichtintensität, gekennzeichnet durch folgende Größen:

- dem Abstand zwischen Lichtleiter und Materialoberfläche
- dem Öffnungsdurchmesser und der Dicke der verwendeten Blenden
- dem Vorhandensein und den optischen Eigenschaften einer Schmelzscheibe im Strahlengang

3. Der Reflektion und Lichtbrechung an der Oberfläche des Füllungsmaterials

4. Der Absorption des wirksamen Strahlenanteils im Füllungsmaterial

5. Der Streuung des Lichts im Füllungsmaterial durch:

- Lichtbrechung
- Reflektion
- Beugung

Die unter 1. genannten von der Bauart der Lichtgeräte abhängigen Bedingungen sind für die einzelnen Produkte durch die Hersteller vorgegeben und damit nicht Gegenstand dieser Untersuchung.

Die unter 2. aufgeführten Versuchsbedingungen sollen bestimmte Merkmale der in-vivo-Aushärtung im Laborversuch simulieren. Der Abstand zwischen Lichtaustrittsöffnung und Füllungs- bzw. Materialoberfläche bestimmt ganz wesentlich die Bestrahlungsstärke, das heißt den Strahlungsanteil, welcher das Material erreicht.

Das quadratische Abstandsgesetz für punktförmige Lichtquellen bezüglich der Verteilung der Lichtenergie ist in diesem Fall jedoch nicht anwendbar, da die Lichtquellen wegen der Größe ihrer Austrittsöffnungen und den in Frage kommenden geringen Distanzen zwischen Lichtleiter und Füllungsmaterial nicht als punktförmig angesprochen werden können.
Trotzdem läßt sich die Abhängigkeit der Bestrahlungsstärke E_d vom Abstand d zwischen der Öffnung des Lichtleiters und der Materialoberfläche mathematisch relativ einfach in einigermaßen guter Annäherung darstellen.

Geht man davon aus, daß das Licht den Lichtleiter gleichmäßig in einem Winkel γ mit der Strahlungsdichte D verläßt, so nimmt der Lichtkegel in Abstand d eine Fläche A_2 ein, auf der das Licht gleichmäßig verteilt ist. Diese Fläche darf für kleine γ annäherungsweise als eben betrachtet werden.
Sind nun Φ der Strahlungsfluß der Lampe, A_1 die Fläche der runden Austrittsöffnung des Lichtleiters und r_1 der Radius derselben, so gilt:

$$D = \frac{d\Phi}{dA}$$ bei gleichmäßiger Lichtverteilung gilt auch

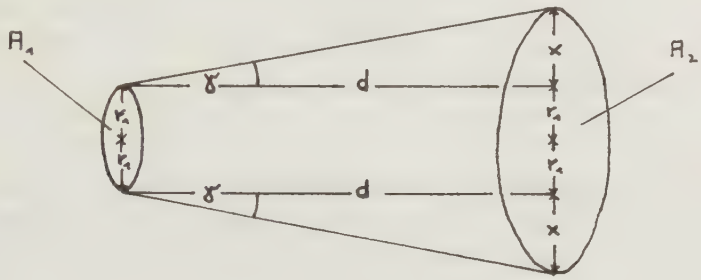
$$D = \frac{\Phi}{A_1} \quad \text{und} \quad E_d = \frac{\Phi}{A_2}$$

$$A_2 = \pi (r_1 + x)^2 \quad \text{mit} \quad x = d \cdot \tan\gamma$$

Also $$A_2 = \pi (r_1 + d \cdot \tan\gamma)^2$$

Daraus folgt: $$E_d = \frac{\Phi}{\pi (r_1 + d \cdot \tan\gamma)^2}$$

Die folgende Skizze veranschaulicht die umseitig beschriebene Situation:

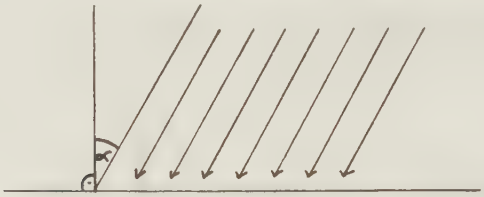


Je größer demnach die Austrittsöffnung des Lichtleiters und je kleiner γ ist, desto weniger spielt der Abstand d des Lichtleiters für die Bestrahlungsstärke E_d eine Rolle. Die maximale Bestrahlungsstärke an der Oberfläche wird erreicht, wenn d=0. Bei der Belichtung lichthärtender Füllungsmaterialien empfiehlt sich daher folgendes Vorgehen:

In der ersten Phase der Belichtung (ca. 15 s) sollte der Lichtleiter im Abstand von 2 - 3 mm von der Füllung entfernt gehalten werden, um die Form der Oberfläche zu erhalten. Wenn diese dann erhärtet ist, kann die Austrittsöffnung des Lichtleiters auf der Füllungsoberfläche zu liegen kommen. Dabei darf kein Druck aufgewandt werden, um die Füllung nicht zu zerstören.

Dadurch wird eine maximale Aushärtung der Füllung bei ansonsten vorgegebener Belichtungszeit erreicht. Wenn möglich soll der Einfallswinkel des Lichtstrahls α auf die Füllungsoberfläche 0° betragen.

Denn bei gegebener Strahlungsflußdichte D ergibt sich die Bestrahlungsstärke E folgendermaßen [22]:



$E = d \cdot \cos\alpha$

für $E = D$ gilt

$\alpha = 0^{\circ}$

Da die oben dargestellten Sachverhalte direkt einsichtig sind und daher keiner experimentellen Untersuchung bedürfen, wurde während der Versuchsserien ein konstanter Abstand zwischen der Austrittsöffnung des Lichtleiters und der Oberfläche des Füllungsmaterials von 4 mm sowie ein Einfallswinkel von 0° gewählt. Ein weiterer wichtiger, die Strahlungsflußdichte bzw. Strahlungsstärke bestimmender Faktor ist die Existenz von Hindernissen im Strahlengang. Dazu zählen zum Beispiel durchsichtige Kunststoffolien, die benutzt werden, um eine möglichst glatte Oberfläche des ausgehärteten Materials zu erhalten. Die Absorption im Bereich dieser Kunststoffolie spielt wegen der geringen Stärke derselben keine Rolle. Desgleichen gilt für die auftretende geringfügige Streuung. Eher zu beachten ist die Reflektion, da die Kunststoffstreifen meist eine stärker glänzende Oberfläche als das unausgehärtete Composite-Material zeigen.

Insgesamt beeinflußt die Benutzung dieser Folien das Ergebnis bezüglich der Ausdehnung der ausgehärteten Materialanteile wohl nicht wesentlich.
Ganz anders ist dies, wenn eine Schmelzschicht im Strahlengang belassen wird. Hier wird, wie die Versuchsserien deutlich zeigen,

22) abgeändert nach Harten, H.U., Physik für Mediziner, Berlin 1975, S. 275

die räumliche Ausdehnung der ausgehärteten Füllungsmaterialanteile erheblich reduziert. Ausschlaggebend dafür sind:

1. Reflektion an der Oberfläche der Schmelzschicht
2. Absorption in der Schmelzschicht
3. Streuung in der Schmelzschicht

Die Auswirkung der Absorption und der Streuung ist von der Dicke der Schmelzschicht abhängig. Auch die Farbe des Schmelzes, die Ausrichtung der Schmelzprismen und der Grad der Verkalkung bestimmen das Ausmaß von Absorption und Streuung. Die genannten Eigenschaften des Schmelzes variieren. Während der Versuchsserien wurde, um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, immer dieselbe 1 mm dicke Schmelzschicht benutzt. Die durch diese im Vergleich zur Situation ohne Schmelzdurchstrahlung hervorgerufene prozentuale Reduktion der maximalen Aushärttiefe Tmax soll hier für die einzelnen Materialien und die benutzten Blenden in der folgenden Tabelle dargestellt werde.

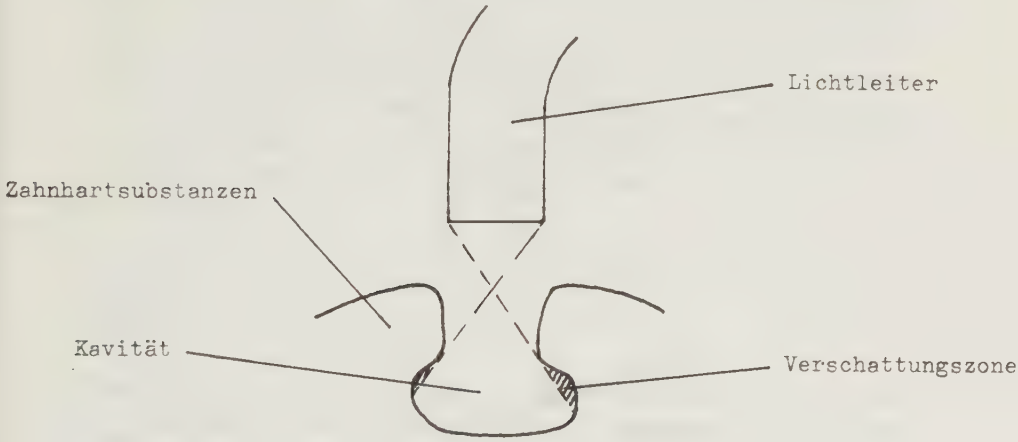
Minderung der Aushärttiefe Tmax infolge Schmelzdurchstrahlung in %

Material / Blendendurchmesser	Visio-dispers	Durafil	Fotofil
1 mm	66,8	71,0	66,9
2 mm	61,4	60,0	39,7
3 mm	52,0	51,0	37,4 x)

x) kann nicht exakt angegeben werden, da die Aushärttiefe ohne die Durchstrahlung der Schmelzschicht über 4 mm betrug und damit die Abmessung des Probenhalters überschritten wurde.

Durch die Durchstrahlung der Schmelzschicht ergeben sich demnach Minderungen der Aushärttiefen von ca. 40 - 70%. Wie die später zur Absorption und Lichtstreuung sowie dem Einfluß der Bestrahlungszeit dargestellten Überlegungen zeigen, kann eine solche Verminderung der Aushärttiefe selbst durch eine Verdoppelung der Bestrahlungszeit nicht kompensiert werden. Daraus folgt, daß stets eine direkte Bestrahlung des Füllungsmaterials anzustreben ist. Kann dies nicht gewährleistet werden, so muß unter Umständen ein anderes Füllungsmaterial benutzt werden, da in diesem Fall mit größerer Sicherheit eine homogen ausgehärtete Füllung zu erreichen ist.
Weitere Hindernisse im Strahlengang treten auf, wenn die Füllungsoberfläche durch Speichel benetzt wird. Auch aus diesem Grund ist ein sorgfältiges Trockenhalten des Füllungsbereichs angezeigt.
Mit Hilfe der in den Versuchsserien benutzten verschiedenen Blenden soll der Einfluß der optischen Verhältnisse an unterschiedlichen Kavitäten auf die Aushärtung der Füllungsmaterialien untersucht werden. Denn trotz der Möglichkeiten der adhäsiven Füllungstechnik mit Composite-Materialien kann in sehr vielen Fällen auf das Legen von Unterschnitten nicht verzichtet werden, um eine ausreichende Retention der Füllung zu erreichen. Das ist besonders dort zu beachten, wo nur minderwertiger oder gar kein Schmelz mehr vorliegt, das heißt im Bereich des Zahnhalses und in anderen Fällen ungenügender Ausbildung der Schmelzprismen.
Unterschnitte können jedoch bezüglich der Aushärtung strahlungshärtender Füllungsmaterialien problematisch werden, entstehen durch sie doch Zonen der Verschattung, wobei es zu einer ungenügenden Aushärtung von Füllungsanteilen kommen kann.

Skizze zur Entstehung von Verschattungszonen
(ohne Berücksichtigung der Streuung im Füllungsmaterial)



Die Skizze oben zeigt die optischen Verhältnisse. Die verschiedenen, während der Versuchsserien benutzten Blenden simulieren diese Situation. Die Blende übernimmt dabei die Funktion der sich über den Bereichen der Unterschnitte befindlichen Schmelz- und Dentinschichten. Zwar hat der Schmelz, wie die Versuche mit Durchstrahlung einer Schmelzschicht zeigen, eine gewisse Durchlässigkeit für Licht im wirksamen Spektralbereich, doch ist dies bei dem wesentlich opakeren Dentin nicht mehr nennenswert der Fall. Damit lassen sich die mit den Metallblenden erreichten Versuchsergebnisse zwar nicht absolut, aber doch in ihrer Tendenz auf klinische Situationen übertragen. Die Fläche der Blendenöffnung entspricht dabei der Ausdehnung der vollständig aufgezogenen Schmelz- und Dentinschicht.

Wird davon ausgegangen, daß die Blende gleichmäßig mit der Bestrahlungsstärke E_L bestrahlt wird, so ist der, das Material erreichende Strahlungsfluß Φ_A proportional der Fläche A der Blendenöffnung und damit zum Quadrat des Durchmessers d der Blendenöffnung:

$$\Phi_A = A \cdot E_L \quad \text{und} \quad A = \frac{1}{2}\pi d^2$$

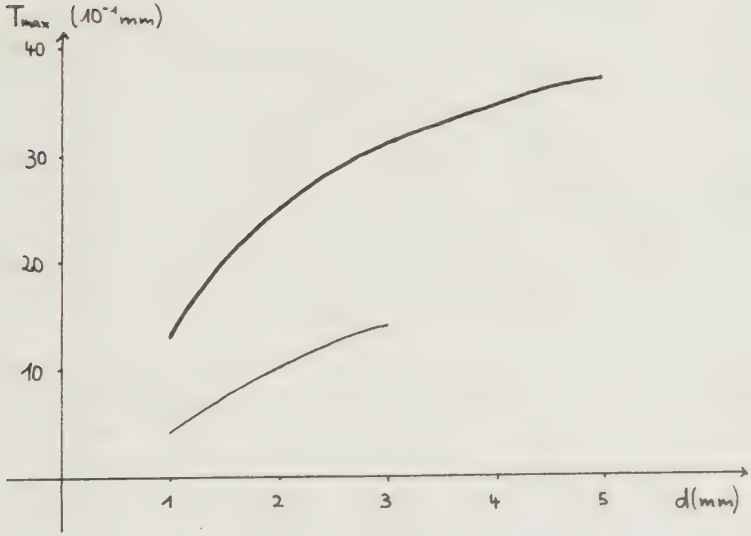
daraus folgt

$$\Phi_A = \frac{1}{2}\pi d^2 \cdot E_L$$

Die im folgenden wiedergegebenen graphischen Darstellungen zeigen die Abhängigkeit der maximalen Aushärttiefen Tmax (Graphik I - III) und der maximalen Aushärtbreiten Bmax (Graphik IV - VI) vom Öffnungsdurchmesser d der Blenden mit und ohne Durchstrahlung einer 1 mm dicken Schmelzschicht.

Graphik I

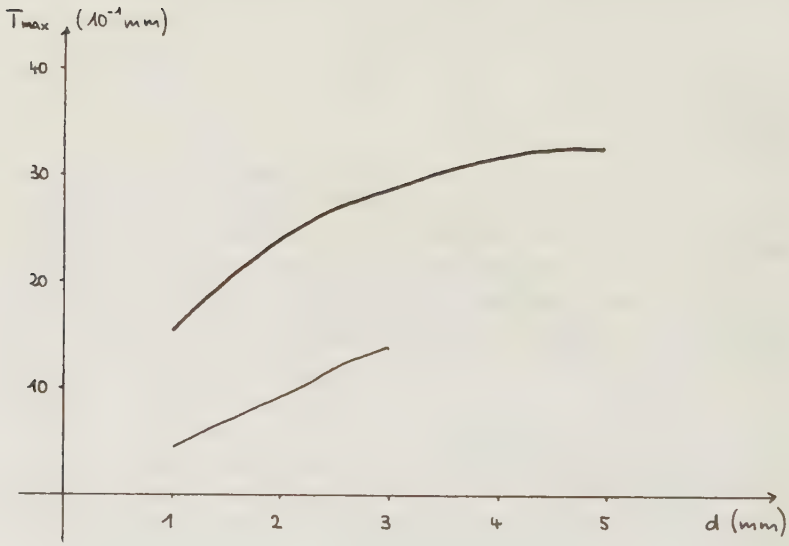
Die Graphik zeigt die Abhängigkeit zwischen der maximalen Aushärtungstiefe Tmax und dem Blendenöffnungsdurchmesser d beim Produkt Visio dispers^{R} (Farbe standard). Die dick gezeichnete Kurve bezeichnet die Verhältnisse ohne die Durchstrahlung einer 1 mm dicken Schmelzschicht. Die dünn gezeichnete Kurve bezeichnet die gleiche Abhängigkeit bei Durchstrahlung einer Schmelzschicht der oben genannten Stärke.



Bei den Versuchsserien mit Durchstrahlung einer Schmelzschicht konnten wegen der naturgemäß begrenzten Ausmaße des Schmelzstücks nur die Blendenöffnungsdurchmesser 1mm, 2mm und 3mm benutzt werden.

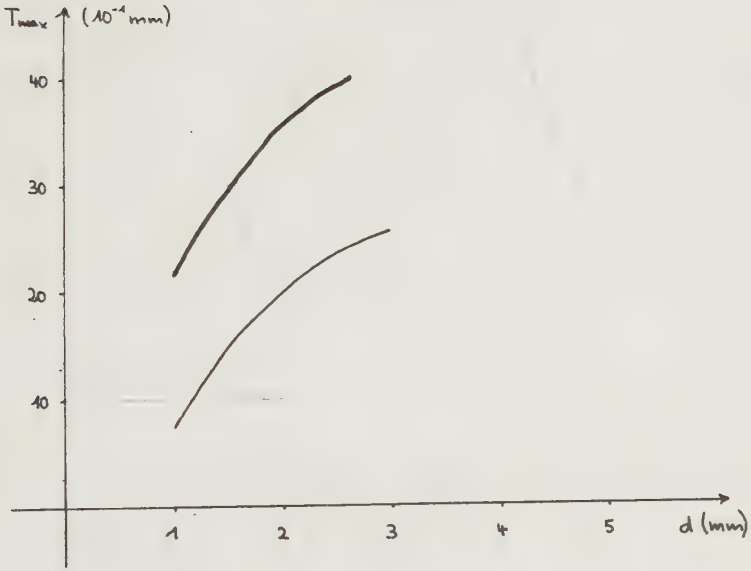
Graphik II

Die Graphik zeigt die Abhängigkeit zwischen Tmax und dem Blendenöffnungsdurchmesser beim Produkt Durafil^{R} (Farbe universal).



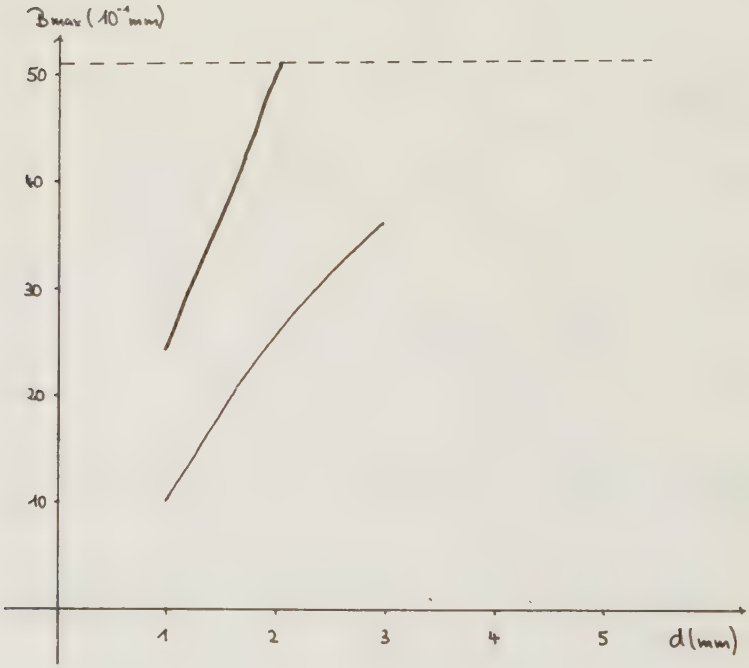
Graphik III

Die Graphik zeigt die Abhängigkeit zwischen Tmax und dem Blendenöffnungsdurchmesser beim Produkt Fotofil^{R} (Farbe universal). Die Begrenzung der Tmax Werte bei 40 x 10^{-1}mm kommt durch die begrenzten Abmessungen der während der Belichtung des Composite-Materials benutzten Probehaltern zustande.



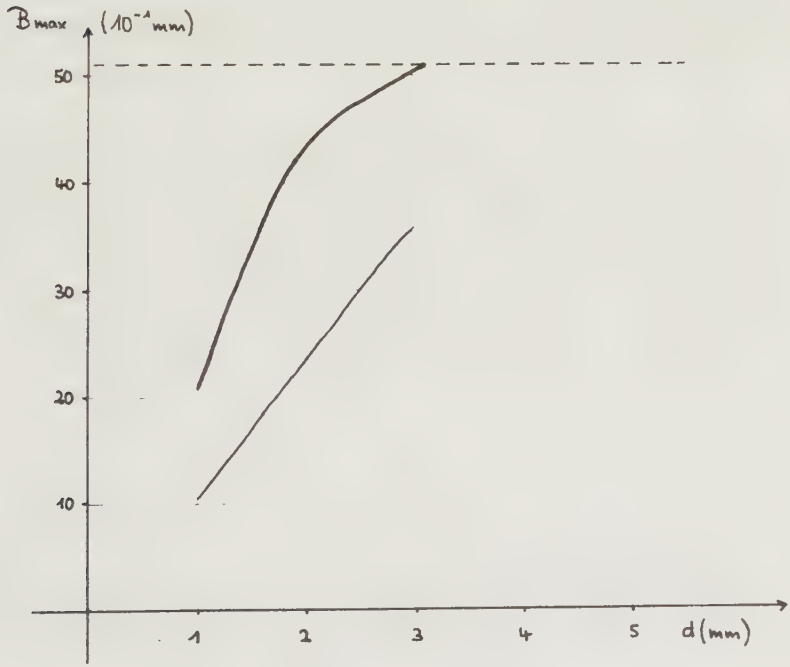
Graphik IV

Die Graphik zeigt die Abhängigkeit zwischen der maximalen Aushärtungsbreite Bmax und dem Blendenöffnungsdurchmesser d beim Produkt Visio dispers^{R}(Farbe standard). Die Begrenzung der Bmax-Werte bei 51 x 10^{-1}mm kommt durch die begrenzten Abmessungen der während der Belichtung des Composite-Materials benutzten Probenhalter zustande.



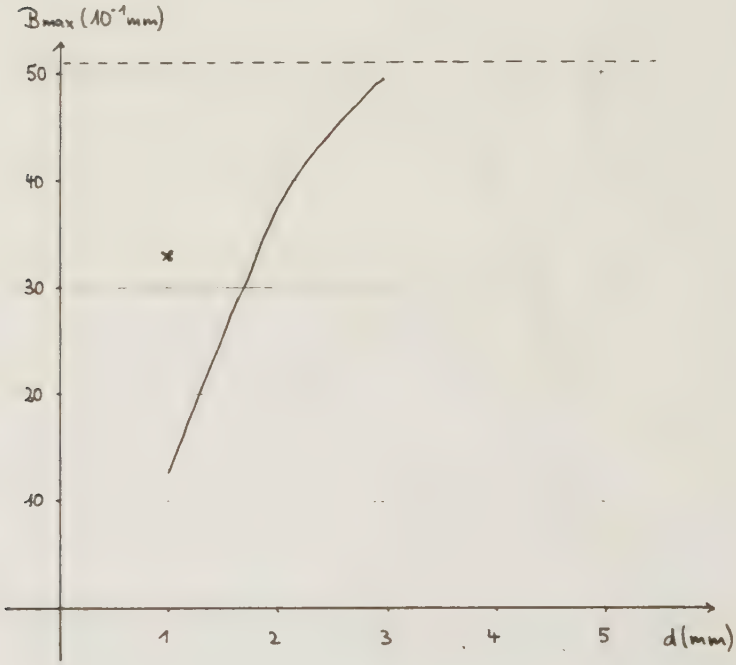
Graphik V

Die Graphik zeigt die Abhängigkeit zwischen der maximalen Aushärtbreite Bmax und dem Blendenöffnungsdurchmesser d beim Produkt Durafil^{R}(Farbe universal). Die Begrenzung der Bmax-Werte bei 51 x 10^{-1}mm kommt durch die begrenzten Abmessungen der während der Belichtung des Composite-Materials benutzten Probenhalter zustande.



Graphik VI

Die Graphik zeigt die Abhängigkeit zwischen der maximalen Aushärtungsbreite Bmax und dem Blendenöffnungsdurchmesser d beim Produkt Fotofil^{R} (Farbe universal). Da bei den Versuchssituationen ohne Schmelzdurchstrahlung nur ein Meßpunkt innerhalb der Abmessungen des Probenhalters liegt, wird nur dieser eine Meßpunkt angegeben.



Bezüglich der maximalen Aushärttiefen läßt sich erkennen, daß diese mit wachsendem Blendenöffnungsdurchmesser zunehmen. Für den Zahnarzt bedeutet dies, daß die erreichbare Aushärttiefe keinesfalls als konstant anzusehen ist, sondern daß die Form und Ausdehnung einer Kavität eine große Rolle im Rahmen des Aushärtungsvorganges spielen. Sehr tiefe, schmale Kavitäten sind bezüglich der vollständigen Erhärtung ungünstig. Werden Schmelz und Dentin großzügiger aufgezogen, so ist auch mit einer größeren maximalen Aushärtungstiefe zu rechnen. Die Zunahme an Aushärttiefe wird jedoch bei sehr weiten Öffnungsdurchmessern immer geringer. Der Zusammenhang zwischen maximaler Aushärttiefe und Blendenöffnung zeigt eine Grenzwertcharakteristik.

Die anfänglich starke Zunahme an Aushärttiefe erklärt sich mit dem Anstieg des das Material erreichenden Strahlungsflusses Φ_A durch die Vergrößerung der Blendenöffnung. Die Grenzwertcharakteristik ergibt sich durch die Beeinflussung des Strahlungsflusses durch Absorption und Streuung im Composite-Material. Denn für die Aushärtung des Materials an einem bestimmten Punkt in der Materialprobe ist die Strahlungsflußdichte $D = \frac{d\Phi}{dA}$ des wirksamen Strahlungsanteils bei gegebener Bestrahlungsdauer ausschlaggebend.

Im folgenden wird die Lichtabsorption im Material unter Anwendung des Lambert-Beer'schen Gesetzes besprochen. Dieses gilt allerdings nur für parallele Lichtbündel. Die Strahlungsflußdichte im Material ist im vorliegenden Fall also nicht alleine durch Anwendung dieses Gesetzes zu beschreiben, da außerdem die große Lichtstreuung im Material zu berücksichtigen ist, die zusätzlich bei zunehmender Materialstärke die Strahlungsflußdichte mindert.

Die Lichtabsorption selbst ist eine universelle Eigenschaft der Materie. Sie kommt durch eine Wechselwirkung der Lichtquanten mit den Elektronenhüllen der Atome zustande. Diese Wechselwirkung

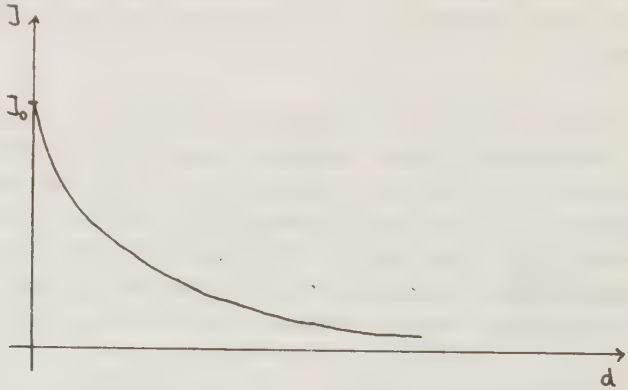
kann bei bestimmten Energiezuständen des Lichts abhängig von der Wellenlänge einmal zu chemischen Veränderungen der Materie, zum anderen aber auch nur zur Erwärmung des Materials führen. Das Lambert-Beer'sche Gesetz beschreibt quantitativ den Vorgang der Lichtabsorption in Abhängigkeit von der Schichtdicke d, der Konzentration c und individuellen Absorptionseigenschaften des absorbierenden Mediums.

Dies stellt sich mathematisch so dar:

$$I = I_0 \cdot e^{-\varepsilon c d}$$

I_0 ist der Lichtanteil, der in das Material eintritt. I ist der Lichtanteil, der das Material mit der Schichtdicke d durchdringt, also der nicht absorbierte Anteil. ε und c sind von den individuellen Eigenschaften des Materials und der Konzentration abhängige Konstanten.

Graphisch ergibt sich:



Die Funktion verläuft asymptotisch zur d-Achse.

Für die Anwendung des Lambert-Beer'schen Gesetzes bezüglich der bei der Strahlungshärtung erzielbaren Aushärttiefen kann nun folgendes entwickelt werden:

Nimmt man an, daß bei einer Versuchssituation A das Composite-Material im Abstand d von der Oberfläche gerade noch aushärtet und die Aushärtungstiefe z.B. durch eine stärkere Lampe bei sonst gleicher Versuchssituation B um den Faktor x erhöht werden soll, so stellt sich bei alleiniger Berücksichtigung der Absorption anhand des Lambert-Beer'schen Gesetzes der Sachverhalt so dar:

I_A sei die Lichtintensität an der Materialoberfläche bei der Versuchssituation A.

I_B sei die Lichtintensität an der Materialoberfläche bei der Versuchssituation B.

I_1 ist die zur Aushärtung gerade notwendige Lichtintensität im Abstand d von der Materialoberfläche bei der Versuchssituation A.

I_2 ist die zur Aushärtung gerade notwendige Lichtintensität im Abstand xd von der Materialoberfläche bei der Versuchssituation B.

Es gilt:

$$I_1 = I_A \cdot e^{-\varepsilon cd} \text{ und } I_2 = I_B \cdot e^{-\varepsilon xcd}$$

$I_1 = I_2$ da die zur Aushärtung gerade notwendige Lichtintensität immer dieselbe ist.

Also : $I_A \cdot e^{-\varepsilon cd} = I_B \cdot e^{-\varepsilon xcd}$

Daraus folgt: $I_B = I_A \cdot e^{-\varepsilon cd(x-1)}$ bzw. $x = \frac{1}{\varepsilon cd} \ln \frac{I_B}{I_A} + 1$

Dies bedeutet, daß für eine lineare Steigerung der Aushärttiefe eine exponentielle Steigerung der effektiven Lichtintensität der Lampe notwendig ist. Dabei ist die ebenfalls die Lichtintensität mindernde Streuung noch nicht berücksichtigt!

Unterstellt man, daß eine entsprechende Steigerung der Lichtintensität technisch möglich wäre, so entsteht bei sehr großer Lichtleistung ein weiteres Problem. Denn eine exponentielle Steigerung der Lichtintensität ergibt eine im gleichen Maße erhöhte Absorption.

Diese wird zum größten Teil in Wärme umgesetzt. Eine solche starke Erwärmung des Füllungsmaterials und des entsprechenden Zahnes ist jedoch aus werkstoffkundlichen, besonders aber auch aus biologischen Gründen zu vermeiden.

So kann zum Beispiel bei einer raschen, starken Erwärmung ein Teil der leichtflüchtigen Bestandteile des Composite-Materials verdampfen, was zur Blasenbildung in der Kunststoffmatrix und damit zur Qualitätsminderung der Füllung insgesamt führt. Auch eine ungünstige Beeinflussung des Dimensionsverhalten der Füllung ist denkbar.

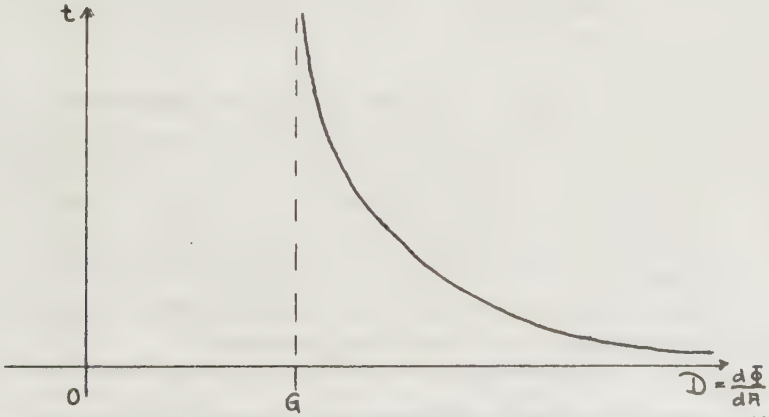
Wesentlich schwerwiegender sind jedoch die biologischen Folgen einer zu starken Temperaturerhöhung. Dabei stehen degenerative Prozesse im Bereich der Pulpa im Vordergrund des Interesses, da diese unmittelbar die Vitalität des entsprechenden Zahnes betreffen. Doch sind auch negative Auswirkungen im Bereich der Zahnhartsubstanzen zu befürchten. So kann eine rasche Temperaturänderung zu Schmelzsprüngen und damit zu Prädilektionsstellen für Karies führen. Eine weitgehende Ausfilterung aller chemisch unwirksamen Strahlungsanteile insbesondere mit einer Wellenlänge von über 500 nm ist daher nicht nur aus Gründen der Vermeidung

übermäßiger Blendwirkung zu fordern, sondern mit Hilfe einer solchen Maßnahme wird auch die Erwärmung der Füllung und des Zahnes reduziert.

Neben der Steigerung der Lichtintensität der Lampe besteht eine weitere Möglichkeit die Aushärttiefe zu vergrößern in einer Verlängerung der Bestrahlungszeit. Denn die Aushärtung hängt grob betrachtet von der Lichtenergiedichte E_A ab, die als Produkt der Strahlungsflußdichte $D = \frac{d\Phi}{dA}$ und der Zeit t darstellbar ist:

$$E_A = \frac{d\Phi}{dA} \cdot t \quad \text{bzw.} \quad \frac{E_A}{t} = \frac{d\Phi}{dA}$$

Die Aushärtung erfolgt jedoch nur solange die Strahlungsflußdichte einen Grenzwert nicht unterschreitet, da es bei chemischen Reaktionen keinesfalls gleichgültig ist, wie schnell eine wirksame Energieform zugeführt wird. Wird nun die Funktion der Wertepaare für t und die dazugehörige Strahlungsflußdichte D dargestellt, so ergibt sich folgende graphische Darstellung, wobei G den eben angesprochenen fiktiven Grenzwert darstellt:



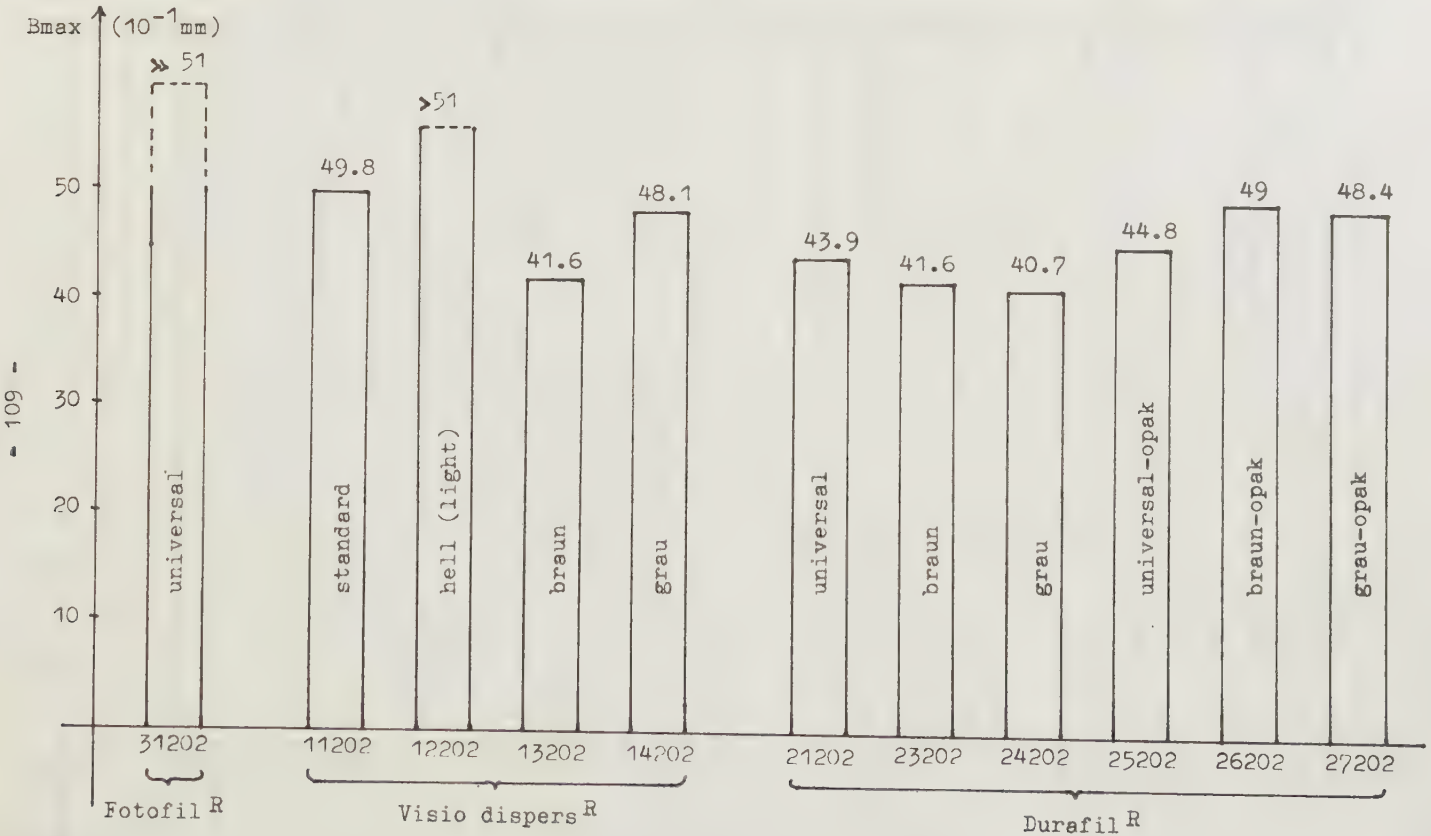
Die Funktion verläuft asymptotisch zur G- und D-Achse. Werden diese Überlegungen unter Berücksichtigung des auf S. 103 ff. zur

Absorption Gesagten auf die Versuchs- bzw. in vivo-Situation übertragen, so ist deutlich zu erkennen, daß der Effekt einer Verlängerung der Bestrahlungszeit bezüglich der Ausdehnung der erhärteten Füllungsanteile leicht überschätzt werden kann.

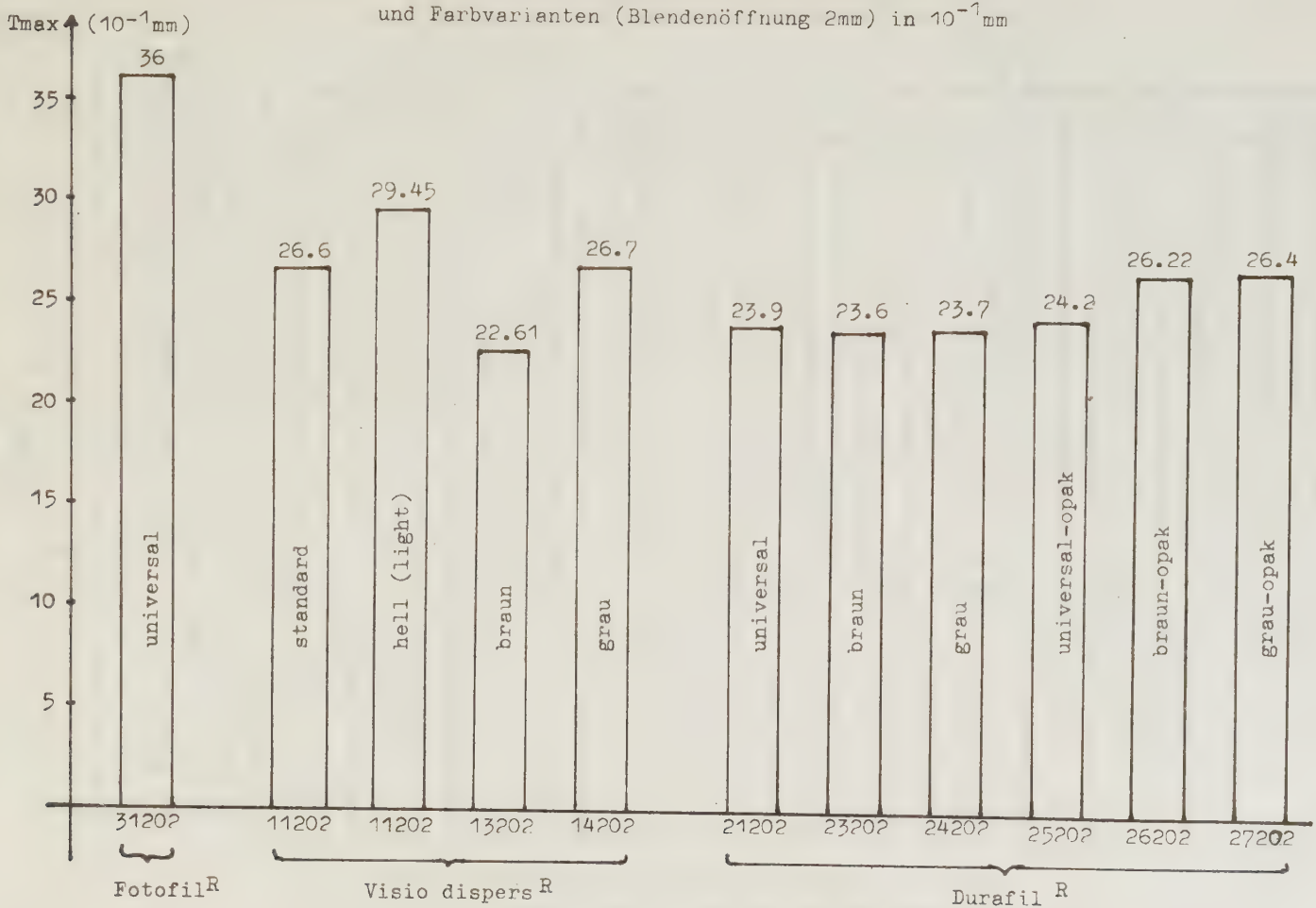
Bezüglich der Absorption muß außerdem bedacht werden, daß diese auch von der Farbe des zu durchstrahlenden Materials abhängt. Diese Farbe des Füllungsmaterials entsteht durch subtraktive Farbmischung unter Absorption der Komplementärfarbe. Es kann daher erwartet werden, daß insbesondere die dunkelbraun gefärbten Chargen eine geringere Ausdehnung der erhärteten Füllungsanteile ergeben. Deshalb wurden in der experimentellen Untersuchung auch die von den Herstellern angebotenen Farbvarianten untersucht. Bei dem Produkt Fotofil^{R} erübrigte sich dies, da der Zahnarzt sofern er zur besseren Farbgebung die Grundfarbe "universal" verändern will, Farbzusätze individuell beimischen kann. Dabei kann damit gerechnet werden, daß eine Reduktion des ausgehärteten Füllungsanteils im Vergleich zur Situation ohne die Beimischung von Farbzusätzen eintritt. Deshalb empfiehlt der Hersteller in diesem Fall eine Verlängerung der Belichtungszeit. Geschieht der Mischvorgang nicht mit genügend großer Sorgfalt, so muß mit Lufteinschüssen und Farbschlieren gerechnet werden.

Die auf den folgenden Seiten wiedergegebenen Schaubilder zeigen die maximal erreichbaren Aushärtbreiten und Aushärttiefen der verschiedenen Produkte und deren Farbvarianten. Beim Produkt Visio- dispers^{R} treten die vermuteten Unterschiede recht deutlich hervor, während dies bei Durafil^{R} zumindest bei den nichtopaken Chargen nicht der Fall ist. Die opaken Chargen zeigen hier bedingt durch die verdoppelte Belichtungszeit eine geringfügig größere Aushärttiefe und Aushärtbreite:

Die maximalen Aushärtungsbreiten der verschiedenen Produkte und Farbvarianten (Blendenöffnung 2mm) in 10^{-1}mm



Die maximalen Aushärtungstiefen der verschiedenen Produkte und Farbvarianten (Blendenöffnung 2mm) in 10^{-1}mm



Die maximalen Unterschiede zwischen den einzelnen Farbvarianten betragen beim Produkt Visio-dispers^{R} in der Aushärttiefe 23,2% (in % der größeren Aushärttiefe) in der Aushärtbreite über 18%. Die größte Ausdehnung des erhärteten Füllungsanteils ergab die Farbvariante "light", die geringste Ausdehnung die Farbvariante "braun".

Beim Produkt Durafil^{R} beträgt der Unterschied für die Aushärttiefen 10% (Farbvarianten "braun" und "grau-opak") und für die Aushärtbreiten 16,9% (Farbvarianten "braun" und "grau-opak"). Die opaken Chargen ergaben dabei stets die größere Ausdehnung der erhärteten Füllungsanteile. Dabei werden Chargen mit unterschiedlichen Belichtungszeiten verglichen. Beim Vergleich der Chargen mit gleicher Belichtungszeit ergibt sich bei den nicht-opaken Chargen ein maximaler Unterschied in der Aushärttiefe von 1,3%, für die maximalen Aushärtbreiten einer von 7,2%. Die entsprechenden Werte für die opaken Chargen liegen bei 8,3% und 8,5%.

Neben der Absorption bestimmt die Lichtstreuung im Material ganz wesentlich die Aushärtbreite und Aushärttiefe. Sie bewirkt eine Umverteilung des Strahlungsflusses im Vergleich zur Situation ohne Streuung. Sie beruht auf den Unterschieden in der optischen Dichte zwischen der organischen Matrix und den anorganischen Bestandteilen des Composite-Füllungsmaterials.[23)]

Betrachtet man die optischen Verhältnisse bezüglich den in den Versuchsserien benutzten Versuchsanordnungen, so wäre bei Benutzung der kleineren Blenden eine mehr kegelförmige Ausdehnung der erhärteten Füllungsanteile zu erwarten.

23) vergl.: Abell A.K., Turner D.T., Leinfelder K.F.; Range of Photopolymerization of Composite Materials; Polymer Preprints Vol. 20 No. 2, 1979 (division of polymer chemistry, Am. Chem. Soc.)

Insbesondere wäre dann eine Aushärtung im Bereich der Unterschnitte nicht zu erzielen. Die Versuchsserien zeigen jedoch eine solche Aushärtung. Die Form der ausgehärteten Füllungsanteile zeigt mehr die Gestalt einer Halbkugel als die eines Kegels. Diese Formabweichung kommt alleine durch die Streuung im Füllungsmaterial zustande. Der Quotient S von maximaler Aushärttiefe Tmax und maximaler Aushärtbreite Bmax kann als ein relatives Maß für die Streuung im Material herangezogen werden. Ist S relativ groß, so ist die Streuung entsprechend gering und umgekehrt. Auf diese Weise können die Produkte und deren Farbvarianten bei jeweils gleicher Versuchsanordnung miteinander verglichen werden. Die entsprechenden S-Werte gibt die Tabelle auf der folgenden Seite wieder.

Sie zeigt für den Versuchsaufbau mit dem Blendendurchmesser von 2mm ohne die Durchstrahlung von Zahnschmelz S-Werte in ähnlicher Größenordnung. Die Einfärbung der Chargen scheint für den S-Wert keine Bedeutung zu besitzen.

Deutlichere Unterschiede in den S-Werten finden sich bei den Versuchen mit einem Blendendurchmesser von 1mm ohne Durchstrahlung von Zahnhartsubstanz, was sich daraus erklärt, daß bei größerem Blendendurchmesser diese immer stärker die maximale Aushärtbreite und damit auch den S-Wert bestimmen.

Es ist festzustellen. daß die untersuchten drei Produkte bezüglich der Lichtstreuung ein ähnliches Verhalten zeigen.

Die Lichtstreuung im Material reduziert zwar die Aushärttiefe ist jedoch eine notwendige Voraussetzung für die Polymerisation in Unterschnitten. In einer Arbeit von Abell u.a. [23], die UV-härtende Composite untersuchten, wird der Effekt der Aushärtung von eigentlich (d.h. ohne Streuung) im Schatten liegenden Materialanteilen "Lateral Polymerization" genannt. Das Ausmaß dieser "Lateral Polymerization" wird, wie dieselben Autoren zeigen, im wesentlichen

Produkt	Farbe	Blenden-durchmesser	Schmelz-durchstrahlung	S-Wert
Visio-dispers^R	standard	1mm	-	0,51
Durafil^R	universal	1mm	-	0,75
Fotofil^R	universal	1mm	-	0,66
Visio-dispers^R	standard	1mm	+	0,4
Durafil^R	universal	1mm	+	0,4
Fotofil^R	standard	1mm	+	0,58
Visio-dispers^R	standard	2mm	-	0,53
	hell	2mm	-	<0,57$^{xx)}$
	braun	2mm	-	0,54
	grau	2mm	-	0,56
Durafil^R	universal	2mm	-	0,54
	braun	2mm	-	0,56
	grau	2mm	-	0,58
	universal-opak	2mm	-	0,54
	braun-opak	2mm	-	0,53
	grau-opak	2mm	-	0,54
Fotofil^R	universal	2mm	-	≪0,7$^{xx)}$
Visio-dispers^R	standard	2mm	+	0,4
Durafil^R	universal	2mm	+	0,4
Fotofil^R	universal	2mm	+	0,57

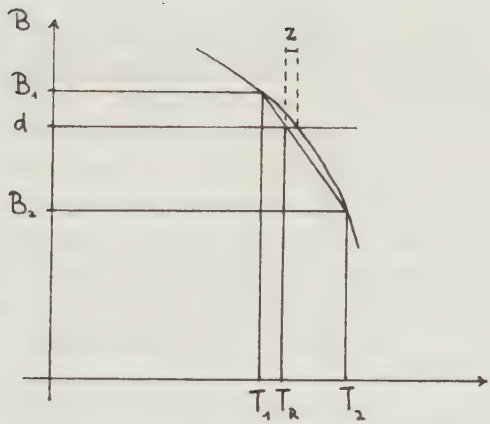
xx) wegen der begrenzten Abmessungen der Probenhalter ließen sich diese Werte nicht bestimmen

durch die Strahlungsabsorption in der organischen Matrix bestimmt, da die Lichtstreuung ohnehin sehr groß ist.

Bisher wurden bei der Diskussion der Ergebnisse nur die Maximalwerte Tmax und Bmax erwähnt. Die Seitenansicht der Materialproben zeigt, daß die Aushärtbreite mit wachsender "Tiefe" rasch zunimmt, Bmax erreicht, um dann bei Tmax den Wert 0 anzunehmen. D.h., daß im realen Einsatz des Füllungsmaterials die Kavität nur an einem einzigen Punkt Tmax erreichen darf, wenn das Füllungsmaterial vollständig erhärten soll.

Um Anhaltspunkte für den praktischen Gebrauch dieser Füllungsmaterialien durch den Zahnarzt zu erhalten, ist es sinnvoll, eine relative Aushärttiefe T_R anzugeben. T_R sei die Tiefe, in der das ausgehärtete Material eine Aushärtbreite B unterschreitet, die dem Durchmesser der jeweils verwendeten Blende entspricht.

Das heißt T_R ist die Aushärttiefe bis zu der eine zylindrische Kavität eines bestimmten Durchmessers vollständig erhärtet. Dabei wird ein Abstand der Lichtleiteroberfläche von 4mm und ein Einfallswinkel des Lichts von 0° vorausgesetzt. Dies gilt dann für den Fall, daß der Schmelz bzw. dessen Oberfläche völlig lichtundurchlässig ist. Da in der Realität der Schmelz eine gewisse Durchlässigkeit für Licht der wirksamen Wellenlängen zeigt, beinhaltet der T_R-Wert eine geringe Sicherheitsmarge. Er wird bei der oben beschriebenen Kavität und unter Einhaltung der übrigen Parameter (Abstand, Einfallswinkel, Polymerisationszeit) in der Regel über - und nie unterschritten. T_R läßt sich aus den Tabellen der Einzelergebnisse nicht exakt ablesen, da ja dort die Aushärtbreite B in Abhängigkeit von der Aushärttiefe T angegeben wird, und so meist der Wert von T für B = d (d = Blendendurchmesser) nicht angegeben ist. Deshalb wird T_R im folgenden als T-Wert des Schnittpunktes einer Geraden zwischen den beiden der Bedingung B = d am nächsten kommenden Meßpunkten und der Geraden B = d angegeben.



Nun gilt:

$$T_R = \frac{(B_1 - d) \cdot (T_2 - T_1)}{B_1 - B_2} + T_1$$

Im vorliegenden Fall gilt $T_2 - T_1 = 1$

Also:

$$T_R = \frac{B_1 - d}{B_1 - B_2} + T_1$$

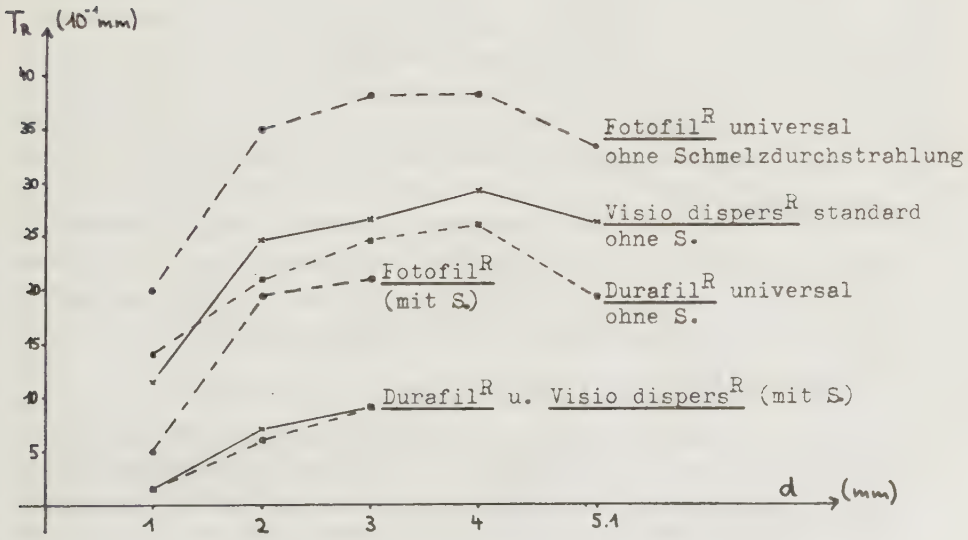
Der dabei entstehende Fehler z ist wegen der geringen Abstände der Meßpunkte voneinander zu vernachlässigen. Die so gewonnenen T_R-Werte werden in der folgenden Tabelle wiedergegeben. Ebenfalls angegeben werden die dazugehörigen Volumina V_R.

Es gilt: $V_R = T_R \cdot \frac{1}{4} \pi d^2$

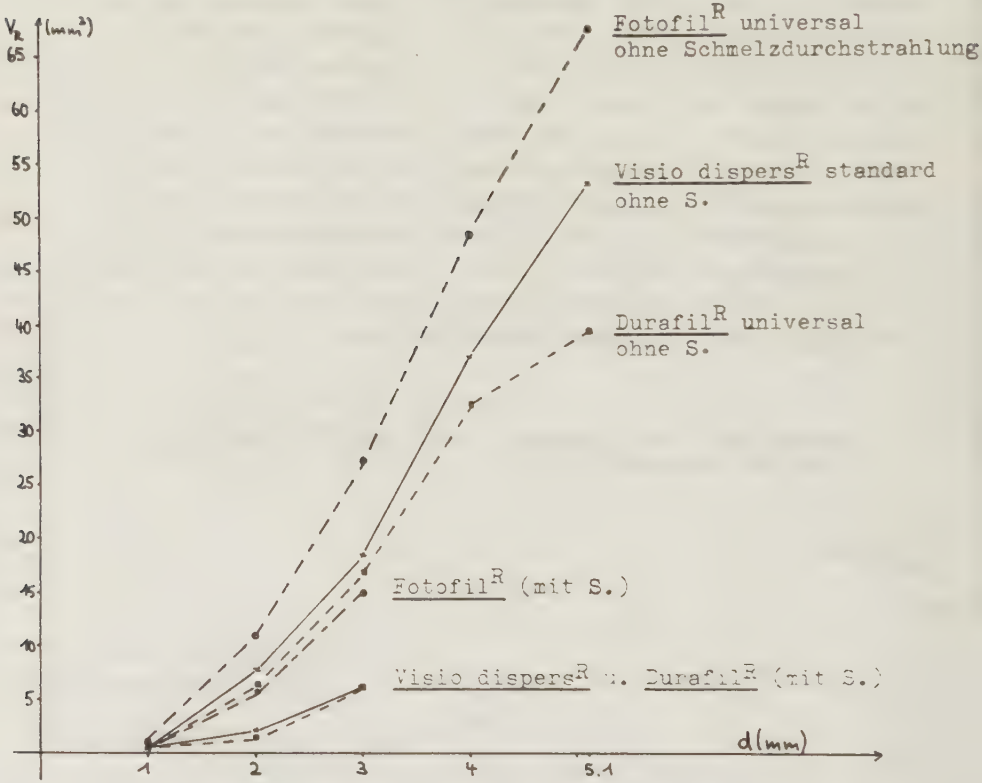
Produkt	Farbe	Blende (in mm)	Schmelzschicht (+/-)	T_R (10^{-1} mm)	V_R (mm^3)
Visio-dispers^R	standard	1	-	11,61	0,91
		2	-	24,43	7,67
		3	-	26,17	18,49
		4	-	29,24	36,74
		5,1	-	26	53,1
		1	+	1,53	0,12
		2	+	7,07	2,22
		3	+	8,3	6,22
	hell	2	-	27,91	8,77
	braun	2	-	19,53	6,13
	grau	2	-	24,86	7,81
Durafil^R	universal	1	-	14,23	1,12
		2	-	21,18	6,65
		3	-	24,37	17,22
		4	-	25,94	32,59
		5,1	-	19	38,81
		1	+	1,8	0,14
		2	+	6	1,88
		3	+	8,9	6,23
	braun	2	-	21,5	6,75
	grau	2	-	21,39	6,78
	universal-opak	2	-	22,20	6,97
	braun-opak	2	-	24,46	7,68
	grau-opak	2	-	24,62	7,73
Fotofil^R	universal	1	-	21,19	1,66
		2	-	34,58	10,86
		3	-	38,84	27,44
		4	-	38,73	48,66
		5,1	-	33	67,4
		1	+	5,26	0,41
		2	+	19,31	6,08
		3	+	21,34	15,08

Bemerkenswert ist es, daß die T_R-Werte im Gegensatz zu den Tmax-Werten bei größer werdender Blendenöffnung ein Maximum zeigen und dann wieder abfallen. Die V_R-Werte steigen mit größerer Blendenöffnung, wobei die Steigung jedoch flacher wird. Theoretisch müssen auch diese ein Maximum zeigen, um dann wieder auf 0 zu sinken, wenn kontinuierlich Blenden mit immer größerem Öffnungsdurchmesser benutzt werden. Die folgenden Schaubilder zeigen den Zusammenhang zwischen den T_R und den V_R-Werten und den Blendenöffnungsdurchmesser d für die Einfärbungen "standard", bzw. "universal" der einzelnen Produkte und für die Versuchssituationen ohne und mit Durchstrahlung einer 1mm dicken Schmelzschicht.

Abhängigkeit des T_R-Wertes vom Blendendurchmesser d



Abhängigkeit des V_R-Wertes vom Blendendurchmesser d



Die Schaubilder zeigen den großen Einfluß der optischen Verhältnisse auf das Aushärtungsverhalten der weißlichthärtenden Composite-Füllungsmaterialien. Dies ist besonders bei der Gestaltung der Kavitäten zu beachten.

Dort, wo die adhäsive Füllungstechnik voll angewandt, also auf Unterschnitte verzichtet werden kann, und die Schichtdicke des Füllungsmaterials ca. 2 - 3 mm nicht überschreitet, erscheint,

wenn die vollständige Erhärtung des Materials als Hauptkriterium betrachtet wird, die Anwendung der untersuchten Materialien weitgehend unproblematisch. Dies gilt jedoch nur dann, wenn das Licht ungehindert und im rechten Winkel auf die Materialoberfläche trifft. Daraus ergibt sich, daß unter Umständen schon approximale oder Füllungen mit approximalen Anteilen schlechter auspolymerisieren (vergl.: Einfluß des Einfallswinkels auf die Bestrahlungsstärke.) Bei mehrflächigen Füllungen sollte wenn möglich jede Fläche einzeln belichtet werden, auch wenn bei Sondierung die Oberfläche schon nach Bestrahlung einer Fläche ausgehärtet erscheint.

Sind bei der Kavitätengestaltung Unterschnitte nicht zu vermeiden, so müssen diese so gelegt werden, daß keine unpolymerisierten Anteile nach der Belichtung zurückbleiben. Sehr tiefe Unterschnitte im Bereich des Kavitätenbodens sind wenn möglich zu vermeiden, was aus der Betrachtung der räumlichen Ausdehnung der erhärteten Füllungsanteile bei den vorne beschriebenen Versuchsserien hervorgeht; wenngleich tiefe Unterschnitte aus anderen Gründen wünschenswert erscheinen, beeinflussen doch nicht oder nur ungenügend durch Dentin gestützte Schmelzschichten die Prognose einer Füllung ungünstig. Wie die Versuchsserien zeigen, kann nur bei Unterschnitten, die nicht tiefer als der jeweilige T_R-Wert liegen, mit vollständiger Aushärtung gerechnet werden. Bei Kavitäten mit sehr tiefen Unterschnitten kann ein schichtweises Auftragen und Erhärten der Materialien Abhilfe schaffen. Gegebenenfalls muß auf 2-Componenten-Composite-Materialien ausgewichen werden.

Eine Erhärtung der untersuchten Materialien bei Durchstrahlung einer 1mm dicken Schmelzschicht ist nach den in dieser Arbeit beschriebenen Versuchsserien zwar möglich, doch muß mit einer erheblichen Reduzierung der erreichbaren Schichtdicke erhärteten Materials gerechnet werden. Die individuelle Beschaffenheit der

jeweils zu durchstrahlenden Schmelzschicht muß beachtet werden. Es ist dabei selbstverständlich, daß eventuell vorhandene Zahnbeläge vor Durchführung der Füllungstherapie entfernt werden müssen.

Die für die vollständige Aushärtung der untersuchten Materialien bei der Füllungstherapie wichtigen Gegebenheiten sollen hier nochmals im Zusammenhang aufgeführt werden:

1. Es dürfen sich keine schattenwerfenden Hindernisse im Strahlengang zwischen der Austrittsöffnung des Lichtleiters und der Füllungsoberfläche befinden. Eine Durchstrahlung von Schmelz ist nur bei kleinen, flachen Kavitäten erfolgversprechend.

2. Die Austrittsöffnungen des Lichtleiters soll so ausgerichtet sein, daß das Licht im rechten Winkel auf die Oberfläche des Füllungsmaterials trifft.

3. Der Abstand zwischen Lichtleiteraustrittsöffnung und Füllung muß so gering wie möglich sein. Nach Erhärtung der obersten Füllungsschicht sollte der Lichtleiter ohne Druck vorsichtig auf der Füllungsoberfläche zu liegen kommen.

4. Die Bestrahlungszeiten, die von den Herstellern angegeben werden, dürfen nicht verkürzt werden. Der Effekt einer verlängerten Bestrahlungszeit bezüglich der Ausdehnung der ausgehärteten Füllungsanteile darf nicht überschätzt werden .

5. Der Einfluß der Kavitätengestaltung auf die räumliche Ausdehnung der erhärteten Füllungsanteile muß beachtet werden. Dies gilt insbesonders für die Anwendung von Unterschnitten.

6. Bei manchen Fabrikaten sind bei verschiedenen eingefärbten Chargen Unterschiede in der Ausdehnung der erhärteten Füllungsanteile zu beachten.

Im übrigen gelten die gleichen Indikationen, die auch für andere Composite-Füllungsmaterialien bestimmend sind.

Literaturverzeichnis

1. Abell A.K., Turner D.T., Leinfelder K.F., Range of Photopolymerization of Composite-Materials; Polymer Preprints Vol. 20 No. 2 1979 (Division of Polymer Chemistry, Am. Chem. Soc.)

2. ADA, Specification No. 27 for Direct Filling Resins; JADA Vol. 94 June 1977 1191 - 1194

3. Asmussen, Erik; NMR-Analysis of Monomers in Restorative Resins Acta Odont. Scand. 33, 129 - 134, 1975

4. Bassiouny, Grant A.A.; A Visible Light Cured Composite Restorative; Brit. dent. J. 1978, 145, 327

5. Birdsell D.C., Bannon P.J., Webb R.B.; Harmful Effects of Near-ultraviolett Radiation Used for Polymerization of a Sealant and a Composite Resin; JADA Vol. 94 Feb. 1977 311 - 314

6. Castagnola L., Garberoglio R.; Heutiger Stand und Zukunftsaussichten der plastischen Füllungsmaterialien; Quintessenz, Juli 1972 Heft 7, 7 - 14

7. Elias H.-G.; Makromoleküle-Struktur-Eigenschaften-Synthesen-Stoffe; Basel und Heidelberg 1971

8. Finger, W.; Festigkeitsuntersuchungen an Composite-Füllungsmaterialien; Schweizerische Monatsschrift für Zahnheilkunde Dez. 1974 Band 74 S. 1311 - 1340

9. Finger, W., Elastizität von Composite-Füllungsmaterialien, DZZ, 30, 1975, S.345 - 349

10. Fischer, C.H., Kritische Betrachtung über die Entwicklung von Komposite-Füllungsmaterialien, DZZ 32, 1977, S.360-366

11. Fuijsawa, S., Imal, Y., Masuhava, E., Löslichkeit und Hämolysegrad als Methoden zur in-vitro-Bewertung von zahnärztlichen Füllungsmaterialien, DZZ 33, 1978, S.706-711

12. Groß, Albert, Kunststoffe in der Zahnmedizin, in: Chemie in unserer Zeit, Jg. 13, Nr.5, Weinheim 1979

13. Harrison, Alan, Droughn, R.A., Abrasive wear, tensile strength and hardness of dental composite resins - Is there a relationship? Journal of Prosthetic Dentistry 36 (4), 1976,S.395-398

14. Harten, H.-U., Physik für Mediziner, Berlin 1975

15. Herz, C.P., Eichler,J., Neisius, K.H., UV-Strahlungshärtung, in: Kontakte, 3/79, S. 37 - 44

16. Kiefer, J., UV-Strahlen, Berlin 1977

17. Klötzer, W.T., Rosenthal, R., Riethe, P., Komposite-Füllungsmaterialien im Tierversuch, DZZ 32, 1977, S. 367 - 372

18. Kollmannsperger, P., Viohl,J., Biegebruchfestigkeit von Füllungskunststoffen in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis, DZZ 32, 1977, S. 529 - 532

19. Kollmannsperger, P., Biegefestigkeit und Biegemodul von zwei photopolymerisierbaren Füllungskunststoffen, DZZ 34, 1979, S. 681 - 683

20. Kulzer Dokumentation, Zur UV-Polymerisation von Composite-Füllungsmaterialien

21. Lampert, F., Heidemann, D., Composite-Füllungsmaterialien in der Zellkultur, DZZ 35, 1980, S. 483 - 485

22. Neupert, Welker, Vergleichende Untersuchungen der zytotoxischen Wirkung von Composite-Füllungsmaterialien und Silikatzement, DZZ 31, 1976, S. 919 - 923

23. Reinhardt, K.J., Vahl, J., Zusammenhang zwischen Härte, Abtrieb und Biegefestigkeit UV-polymerisierbarer Adhäsie, DZZ 32, 270 - 272

24. Reinhardt, K.J., Vahl, J., Aushärtung photopolymerisierbarer Versiegelungsmaterialien in verschiedenen tiefen Schmelzzonen (in-vitro), DZZ 32, 1977, S. 848 - 852

25. Reinhardt, K.J., Vahl, J., Zur Frage der Normvorschriften für Komposite, DZZ 34, 1979, S. 27 - 29

26. Reinhardt, K.J., Vahl. J., Ein Vergleich lichthärtender und UV-polymerisierbarer Versiegler und Komposite, DZZ 34, 1979, S. 245 - 250

27. Rehberg, H.J., Composite filling materials, ZM 4, 1973, S. 159 - 164

28. Roulet, J.F., Mettler, P., Friedrich, U., Die Abrasion von Amalgam und Komposite im Seitenzahnbereich, DZZ 33, 1978, S. 206 - 209

29. Ruske, W., Einführung in die organische Chemie, Weinheim 79

30. Schildknecht, C.E., Vinyl and related polymers, New York 59

31. Schwickerath, H., Werkstoffe in der Zahnheilkunde, Berlin 77

32. Smets, G., Reticulation photochemique de materiaux polymeres, in: Informations Chimie, Nr. 180/181, 1978

33. Viohl, J., Wie tief polymerisieren UV-härtende Kunststoffe, DZZ 33, S. 476

34. Viohl, J., Eickhoff, A., Wasseraufnahme und Löslichkeit von Füllungskunststoffen in Abhängigkeit von Mischungsverhältnissen bzw. von der Bestrahlungszeit, DZZ 34, 1979, S. 687 - 690

35. Vollmert, B., Grundriss der makromolekularen Chemie, Berlin 62

36. Welker, D., Katenkamp, D., Neupert, G., Bindegewebsreaktionen nach Inplantationen von Composite-Füllungsmaterialien und Silikatzement, DZZ 32, 1977, S. 533 - 536

Lebenslauf

Ich, Stephan Paul Ulmschneider wurde am 6. März 1957 in Stuttgart - Bad Cannstatt als Sohn des Chemikers Dr. Dieter Ulmschneider und seiner Frau Elisabeth geboren.
1958 zogen meine Eltern und ich nach Frankfurt am Main - Höchst, wo ich von 1963 bis 1967 die Karl von Ibell - Grundschule und von 1967 bis Ende 1968 das Leibniz Gymnasium besuchte.
Nach einem weiteren Umzug meiner Eltern nach Königstein im Taunus besuchte ich dort ab Januar 1969 die Taunusschule, wo ich 1976 die Reifeprüfung ablegte.
Noch im selben Jahr begann ich mit dem Studium der Zahnheilkunde an der Johannes Gutenberg Universität in Mainz. Dort bestand ich im Sommer 1977 die naturwissenschaftliche Vorprüfung und im Winter 1978/79 die zahnmedizinische Vorprüfung.
Am 6. März 1981 heiratete ich meine Frau Mechthild, geb. Mühlhaus, Studentin der katholischen Religionslehre und Englisch für das Lehramt an Gymnasien.
Ich schließe im Spätherbst 1981 mein Studium der Zahnheilkunde mit dem Staatsexamen ab.

An dieser Stelle möchte ich Herrn Professor Dr. F. Lampert für die Themenstellung, seine Bereitschaft, jederzeit anstehende Fragen zu erörtern, und für die Anfertigung des ersten Gutachtens herzlich danken.
Ebenso danke ich Herrn Professor Dr. Dr. W. Ketterl für die Erstellung des zweiten Gutachtens.